УДК 681.5

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ЦИФРОВОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура, Р.Т. Емельянов, Н.А. Сафаров

Сибирский федеральный университет (СФУ), 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82

Аннотация. Предлагается метод синтеза цифровых регуляторов систем управления с электрогидравлическим исполнительным приводом, основанный на сочетании метода синтеза цифровой части системы по непрерывному прототипу и экспертного подхода.

На первом этапе синтезируется непрерывный регулятор на основе известных методик. На втором этапе происходит переход к цифровому регулятору с помощью z-преобразования, определяется разностное уравнение. Осуществляется выбор периода дискретизации при частоте, большей, чем частота, определяющая полосу пропускания непрерывной системы управления электрогидравлическим приводом (насколько большей — определяется из дальнейшего моделирования и оценки получаемых результатов). На третьем этапе проводится моделирование для вариантов цифрового регулирования с выбранными частотами дискретизации и пересчитанными значениями параметров регуляторов. Приведен пример синтеза цифрового регулятора на конкретном примере электрогидравлической системы управления.

Ключевые слова: электрогидравлический привод, цифровая система управления, синтез дискретного регулятора, нелинейная система управления

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.346-353

PECULARITIES OF THE SYNTHESIS OF DIGITAL NONLINEAR CONTROL WITH ELECTRO-HYDRAULIC DRIVE

A.P. Prokopiev, V.I. Ivanchura, R.T. Emelianov, N.A. Safarov

Siberian Federal University (SFU), 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Abstract. The method of synthesis of digital nonlinear control with an electro-hydraulic drive is proposed. It is based on the combination of the method of synthesis of the digital part of the system with a continuous prototype and the expert approach.

At the first stage, the continuous regulator is synthesized based on known techniques. At the second stage, a transition to the digital regulator is performed with the help of the z-transformation and the difference equation is determined. The sampling period is selected at a frequency greater than the frequency that determines the bandwidth of the continuous electrohydraulic drive control system (its degree is determined by way of further modeling and evaluation of the results obtained). In the third stage, the modeling for digital control options with selected sampling frequencies and recalculated parameter values of the regulators is carried out. The example of the synthesis of a digital regulator with the use of electro-hydraulic control system is given.

Key words: electro-hydraulic drive; digital control system; synthesis of the discrete controller; nonlinear control system

Наибольшее распространение в автоматизированных системах управления технологическими процессами получили цифровые регуляторы. Проблема синтеза регуляторов систем управления — одна из основных предметных задач теории автоматического управления.

Методы синтеза регуляторов линейных систем управления достаточно хорошо изучены. В реальных системах управления в качестве исполнительных механизмов часто используются электрогидравлические приводы (ЭГП), имеющие признаки нелинейности. Нелинейностью является, например, ограничение

энергетических возможностей насосной установки ЭГП — давления рабочей жидкости и производительности насоса — что приводит к нелинейности типа насыщения или ограничения выходных сигналов ЭГП.

Внедрение микропроцессорных систем управления в различных отраслях, в т.ч. в строительстве, предполагает решение прикладных задач управления объектами. Автоматизация технологических процессов в строительстве является актуальным направлением повышения эффективности народного хозяйства.

Дорожно-строительные машины (ДСМ) как объекты управления являются мобильными машинами,

имеют преимущественно ЭП основных механизмов и характеризуются как динамические системы. Для автоматизации машин применяются централизованные и децентрализованные микропроцессорные системы управления.

В работах [1–3] рассмотрены различные аспекты задачи автоматизированного управления ДСМ с применением непрерывных регуляторов, а в [4, 5] — задачи синтеза непрерывных регуляторов нелинейных систем управления на основе частотного и модального методов.

Методы анализа и синтеза дискретных систем управления динамическими объектами рассмотрены во многих исследованиях, например в работах [6–10].

В книге [11] описывается три возможных варианта проектирования цифровых систем управления. Для синтеза регулятора реальной системы управления в прикладной области наиболее удобным является метод синтеза цифровой части системы по непрерывному прототипу (переоборудования непрерывного регулятора) [12].

Известно, что непрерывные переменные удобно использовать для анализа и синтеза пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов [13]. Для технической реализации регулятора на основе контроллера или компьютера, который оперирует с переменными, полученными из аналоговых сигналов после дискретизации по времени и квантованию по уровню, необходимо перейти к дискретной форме уравнений.

При правильном проектировании систем автоматизированного управления (с достаточной разрядностью по АЦП/ЦАП) квантованием по уровню чаще всего можно пренебречь, если учесть накопление погрешности, а квантование (дискретизацию) по времени необходимо учитывать [14]. В этом случае системы могут рассматриваться как импульсные. Для таких систем имеется хорошо разработанный математический аппарат [15].

Задача выбора периода дискретизации является актуальной, ей посвящены современные научные публикации [16, 17]. Теоретической основой всей цифровой обработки, хранения и передачи сигналов является теорема Котельникова (теорема Найквиста—Шеннона) [14, 18–20].

Для того чтобы непрерывный сигнал со спектром, ограниченным максимальной частотой $\omega_{\max}$, можно было точно восстановить по последовательности его дискретных значений, необходимо, чтобы частота квантования ω_0 удовлетворяла условию

$$\omega_0 \geq 2\omega_{\max}.$$

Следовательно, для такта квантования T_0 , согласно уравнению $\omega_0 = 2\pi/T_0$, должно выполняться условие [19]

$$T_0 \leq \frac{\pi}{\omega_{\max}}. \quad (1)$$

Полученный результат составляет результат теоремы прерывания, сформулированной Шенноном (в отечественной литературе — Котельниковым).

Можно отметить, что в системах управления или передачи информации на практике непрерывные сигналы с ограниченными спектрами не встречаются. Тем не менее, в теории цифрового управления шенноновская частота

$$\omega_{Sh} = \omega_0/2 = \pi/T_0,$$

играет роль своего рода эталонной константы. Она определяет полосу пропускания дискретной системы [19].

Следует подчеркнуть, что в строгом смысле теорема Котельникова в практических задачах никогда не выполняется. Причина — ограниченность временного интервала обработки сигналов [21]. Известно достаточно большое число рекомендаций по назначению периода квантования, зависящее от физического характера управляемых процессов и особенностей системы [15]. В практике управления получило распространение следующее правило: частота квантования должна быть на порядок больше полосы существенных частот объекта [22].

В статье [17] авторы предлагают определять диапазон возможного периода дискретизации T_0 по формуле

$$T_0 \leq \frac{T_d}{4/10},$$

где T_d — постоянная времени дифференцирования регулятора.

В работе [23] рациональный выбор частоты квантования в системах с замкнутым контуром управления производится исходя из ширины полосы пропускания или из времени разгона системы. При управлении могут использоваться относительно низкие частоты квантования, так как динамические характеристики многих объектов невелики, а их постоянные времени обычно больше времени разгона замкнутой системы в 3–5 раз:

$$T_{\text{ц}} \approx \frac{\sum T_i}{15/50},$$

где T_i — постоянные времени моделируемого объекта управления.

В работе [24], посвященной микроконтроллерам, в разделе о реализации цифрового управления обобщена теория и практика выбора интервала дискретизации. Даны следующие рекомендации:

- если объект управления имеет доминирующую постоянную времени, тогда интервал дискретизации T для замкнутой системы можно выбрать из условия $T < T_p/10$;

- если для замкнутой системы управления имеются время установления переходного процесса T_{ss} или собственная частота ω_n , тогда интервал дискретизации T выбирается из условия $T < T_{ss}/10$ и $\omega_s > 10\omega_n$, $\omega_s = 2\pi/T$, где ω_s — частота дискретизации.

В работе В.Г. Зырянова [16] отмечается, что период (шаг) дискретизации T_0 является весьма специфическим и важным параметром цифровой системы управления, так как от него зависят сложным, трансцендентным образом многие из коэффициентов дискретной модели «неизменяемой части» разомкнутой

нескорректированной системы управления, а следовательно, и показатели качества. Поэтому синтез цифрового алгоритма управления в общем виде, при неизвестном заранее значении T_0 , оказывается возможным лишь в простейших, не имеющих практического значения случаях. Обычно в соответствии с какими-либо рекомендациями задают конкретное значение T_0 , а затем аналитическим или частотным методом динамического синтеза цифровых систем автоматизированного управления (ЦСАУ) определяют передаточную функцию цифрового корректирующего устройства $W_{\text{цк}}(z)$. При необходимости (например, если получен слишком сложный вид $W_{\text{цк}}(z)$, не выполняются ограничения на показатели качества и т.п.) расчет повторяют многократно для других, измененных значений T_0 до получения компромиссного, приемлемого для практической реализации результата.

Существуют различные рекомендации по выбору величины T_0 при синтезе ЦСАУ. Так, например, в исследовании [25] рекомендовано в качестве начального приближения частоту дискретизации назначать примерно в шесть раз больше частоты среза непрерывной части ЦСАУ.

Дискретизация детерминированных сигналов с ограниченной энергией в соответствии с теоремой Котельникова—Шеннона получила в 1960-х годах твердую теоретическую базу. Однако дискретизация случайных сигналов до сих пор не нашла удовлетворительного для прикладных целей математического обоснования, что приводит на практике к неправомерному применению теоремы отсчетов и некорректным ее интерпретациям при цифровой обработке сигналов [26].

По Г. Олссону [27], определение адекватной частоты выборки для процесса управления представляет собой нетривиальную задачу и скорее может рассматриваться как искусство, чем наука, представляя собой компромисс между требованиями динамики процесса и производительностью компьютера и других технологических механизмов.

С целью обеспечения качества переходного процесса, близкого к аperiodическому характеру изме-

нения переходной характеристики, требуется разработать метод параметрического синтеза цифрового регулятора нелинейной системы управления линейными объектами. Задача синтеза цифрового регулятора решается в прикладной области систем управления ДСМ с ЭГП. При этом необходимо учесть значительную инерционность систем ЭГП, применяемых в ДСМ. Рассматривается нелинейная цифровая система управления с обратной связью, включающая одномерный линейный объект управления и дискретный регулятор.

Структурная схема системы управления с нелинейным приводом (звено типа «ограничение») приведена на рис. 1.

Объект регулирования имеет передаточную функцию $W_o(s)$ второго порядка

$$W_o(s) = \frac{b_0}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}.$$

Передаточная функция разомкнутого контура линейной системы с ПИД-регулятором имеет вид

$$W(s) = W_y(s)W_o(s) = \frac{K_d b_0 s^2 + K_p b_0 s + K_i b_0}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s}.$$

Величины насыщения и вид используемой нелинейной характеристики обусловлены особенностями конструкции применяемого гидравлического насоса (регулируемого, нерегулируемого). Управление осуществляется изменением сигнала управления давлением насоса.

При нулевых начальных условиях диапазон изменения сигнала задающего воздействия на систему определяется ограничением выходной переменной нелинейного элемента единичным отрицательным или положительным значениями. Поэтому заданное значение выходной регулируемой переменной (в нашем случае — скорости вращения гидромотора) также ограничено значениями коэффициента передачи объекта управления $W_o(0)$. Это не противоречит практике. Поэтому

$$|g(t)| \leq W_o(0). \quad (2)$$

Рис. 1. Структурная схема нелинейной системы управления: $W_o(s)$ — передаточная функция объекта регулирования; $W_y(s)$ — передаточная функция регулятора; $g(s)$ — задающее воздействие; $\varepsilon(s)$ — ошибка регулирования; $u(s)$ — управляющее воздействие; $\bar{u}(s)$ — управляющее воздействие с учетом влияния нелинейного звена; $y(s)$ — выходная регулируемая величина

Fig. 1. Structural chart of the nonlinear control: $W_o(s)$ — transfer function of the controller; $W_y(s)$ — transfer function of the regulator; $g(s)$ — reference-input signal; $\varepsilon(s)$ — control error; $u(s)$ — control action; $\bar{u}(s)$ — control action taking into account the influence of the non-linear link; $y(s)$ — the output controlled variable

При ненулевых начальных условиях диапазон изменения сигнала выходной переменной системы также ограничен похожим на формулу (2) выражением

$$|\Delta y(t)| \leq W_0(0). \quad (3)$$

Это накладывает ограничение ненулевых начальных условий $y(0)$ на возможное задание и приводит к изменению неравенства (2). Так, при положительных значениях $g(t) > 0$ и $y(0) > 0$ выражение (2) в соответствии с (3) будет иметь вид

$$g(t) \leq W_0(0) + y(0). \quad (4)$$

Это выражение сохранится и при отрицательных значениях $y(0) < 0$. Откуда следует, что при отрицательных значениях нулевого условия и $g(t) > 0$ справедливо $|y(0)| < W_0(0)$.

Подобные выражения могут быть получены и при отрицательных значениях $g(t) < 0$. Так, если при этом $y(0) < 0$, то выражение (2) с учетом (3) будет иметь вид

$$g(t) \geq -W_0(0) + y(0). \quad (5)$$

Это выражение сохранится и при положительных значениях $y(0) > 0$. Откуда следует, что при положительных значениях нулевого условия и $g(t) < 0$ также справедливо $|y(0)| < W_0(0)$.

При синтезе цифрового регулятора решается задача переоборудования, заключающаяся в замене непрерывного регулятора цифровым, с сохранением важнейших свойств непрерывной системы (рис. 2).

Наличие нелинейностей гидравлических исполнительных приводов, значительная инерционность систем ЭГП, применяемых в ДСМ, дает основание предложить алгоритм синтеза цифровых регуляторов для таких систем управления, основанный на способе переоборудования непрерывного регулятора.

Этап 1. Регулятор синтезируется как непрерывный по известным методикам, в т.ч. по опубликованным авторами [4, 5].

Этап 2. Осуществляется переход к цифровому регулятору по известному выражению [27] дискретной передаточной функции

$$M(z) = W_p(z)E(z) = \left[K_p + \frac{K_i Tz}{z-1} + \frac{K_d(z-1)}{Tz} \right] E(z). \quad (6)$$

Полученной дискретной передаточной функции (6) цифрового ПИД-регулятора соответствует разностное уравнение

$$U(kT) = U((k-1)T) + a\varepsilon(kT) + b\varepsilon((k-1)T) + c\varepsilon((k-2)T),$$

где U — выходная переменная цифрового ПИД-регулятора; ε — входная переменная цифрового ПИД-регулятора (ошибка регулирования); величины

$$a = (K_p + K_i T + K_d T^{-1});$$

$$b = -(K_p + 2K_d T^{-1});$$

$$c = K_d T^{-1}.$$

Частота дискретизации берется больше, чем порога пропускания непрерывной системы управления ЭГП, насколько больше — это определяется из дальнейшего моделирования и оценки получаемых результатов. Как отмечается в работе Г. Олссона [27], выбор частоты — это, скорее, искусство, подкрепленное инженерной интуицией и практическим опытом.

Этап 3. Моделирование проводится для вариантов цифрового регулирования с выбранными частотами дискретизации и пересчитанными значениями параметров по формуле (1). Схема модели определяется использованием библиотек среды Simulink и опыта моделирования [28].

Приведем пример реализации этой методики синтеза цифрового регулятора.

Объект управления описывается передаточной функцией [29]

$$W_0(s) = \frac{115,05}{2,473s^2 + 10,5s + 26,98}.$$

Зададим показатели качества управления. Время переходного процесса выходного сигнала (5%-ная зона) — не более 1 с. Перерегулирование во всем диапазоне не должно превышать $\sigma < 8\%$.

В результате применения современного программного обеспечения и численных методов исследования определены параметры непрерывного ПИД-регулятора в частотной области по методике аналитического синтеза [26]:

$$K_p = 2,634; K_i = 1,445; K_d = 0,615.$$

Рис. 2. Структурная схема цифровой нелинейной системы управления

Fig. 2. Structural chart of digital nonlinear control

При переходе к цифровому варианту ПИД-регулятора, который определяется дискретной передаточной функцией $W_p(z)$, пропорциональная часть аналогового регулятора сохраняет свое значение K_p ; интегральная часть, в аналоговом варианте имеющая вид $\frac{K_i}{s}$, заменяется дискретной передаточной функцией $\frac{K_i Tz}{z-1}$; а дифференциальная часть, в аналоговом варианте имеющая вид $K_d s$, заменяется дискретной передаточной функцией $\frac{K_d(z-1)}{Tz}$ [28]. Таким образом, дискретная передаточная функция цифрового варианта регулятора будет иметь следующий вид:

$$W_p(z) = K_p + \frac{K_i Tz}{z-1} + \frac{K_d(z-1)}{Tz},$$

где T — период дискретизации, с.

Дискретной передаточной функции цифрового ПИД-регулятора соответствует разностное уравнение

$$U(kT) = U((k-1)T) + a\varepsilon(kT) + b\varepsilon((k-1)T) + c\varepsilon((k-2)T),$$

где U — выходная переменная цифрового ПИД-регулятора; ε — входная переменная цифрового ПИД-регулятора (ошибка регулирования),

$$a = (K_p + K_i T + K_d T^{-1});$$

$$b = -(K_p + 2K_d T^{-1});$$

$$c = K_d T^{-1}.$$

Определяем параметры цифрового ПИД-регулятора: пропорциональная часть не изменяется, а интегральная и дифференциальная части будут иметь вид

$$W_i(z) = \frac{K_i Tz}{z-1};$$

$$W_d(z) = \frac{K_d(z-1)}{Tz}.$$

Выполнено исследование цифровой системы управления с изменением периода дискретизации в диапазоне от $T = 0,01$ с до $T = 0,005$ с.

Результаты моделирования цифровой системы управления при $T = 0,01$ с показаны на рис. 3.

На графике на рис. 3 видно, что при данной частоте дискретизации присутствуют значительные пульсации момента, что в нашем случае недопустимо.

Моделирование системы управления с цифровым регулятором ($T = 0,005$ с) при изменении основных возмущающих воздействий показывает, что при данной частоте практически отсутствуют пульсации момента и скорости, что соответствует заданию.

Результаты моделирования системы управления с аналоговым и цифровым регулятором при $T = 0,005$ с показывают хорошее совпадение управляемого процесса (рис. 4).

Относительная ошибка в динамике процесса управления для момента меньше 7 %, а для частоты вращения — меньше 2 % (рис. 5).

Рассмотренный пример подтверждает возможность использования предлагаемой методики синтеза ПИД-регулятора для систем управления с гидравлическими исполнительными механизмами мобильных машин.

Таким образом, нами предложена методика синтеза цифровой системы управления с ЭП, характерным для строительных и дорожных, сельскохозяйственных и других мобильных машин. Требуемое качество процесса управления обеспечивается рациональным определением частоты дискретизации цифрового регулятора замкнутой системы. В основу методики положен следующий постулат: частота дискретизации берется больше, чем полоса пропускания непрерывной системы управления ЭП, насколько больше — определяется из дальнейшего моделирования и оценки получаемых результатов.

Достоинством метода является возможность организации диалоговых процедур проектирования цифровых регуляторов систем автоматизированного управления. Этапы построения параметров регулятора могут быть наиболее эффективно реализованы в программной среде MATLAB&Simulink.

Рис. 3. График изменения момента и частоты вращения гидромотора во времени

Fig. 3. Graph of variance of the point and rate of rotation of the hydraulic oil motor in time

Рис. 4. График изменения момента и частоты вращения гидромотора во времени
Fig. 4. Graph of variance of the point and rate of rotation of the hydraulic oil motor in time

Рис. 5. График переходного процесса
Fig. 5. Transient curve

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т. Комплексная автоматизация технологических процессов устройства дорожных покрытий. Красноярск : Сибир. федер. ун-т, 2011. 152 с.
2. Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Иванчура В.И. Методы управления технологическими процессами строительства асфальтобетонных покрытий. 2-е изд., перераб. и доп. Красноярск : Сибир. федер. ун-т, 2012. 256 с.
3. Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Кустарев Г.В. и др. Автоматизация технологических процессов дорожного строительства. Красноярск : Сибир. федер. ун-т, 2013. 245 с.
4. Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т. Особенности синтеза регулятора нелинейной системы управления // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-27) : сб. тр. XXVII междунар. науч. конф. : в 12 т. / под общ. ред. А.А. Большакова. Тамбов : Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. Т. 5. Секции 1, 2, 5. С. 79–83.
5. Прокопьев А.П., Иванчура В.И. Особенности синтеза регулятора электрогидравлической системы управления // тр. XII Всеросс. совещания по проблемам управления ВСПУ-2014 (г. Москва, 16–19 июня 2014 г.). М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2014. С. 307–317.
6. Дерезицкий Д.П., Фрадков А.Л. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления. М. : Наука, 1981. 216 с.
7. Солодовников В.В., Коньков В.Г., Суханов В.А. и др. Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы. М. : Высш. шк., 1991. 255 с.
8. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. СПб. : Политехника, 2003. 302 с.
9. Поляков К.Ю. Основы теории цифровых систем управления. СПб. : ГМТУ, 2006. 161 с.
10. Муромцев Д.Ю., Яшин Е.Н. Анализ и синтез дискретных систем. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2011. 108 с.
11. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления / пер. с англ. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 911 с.
12. Бесеерский В.А., Ефимов Н.Б., Зиятдинов С.И. Микропроцессорные системы автоматического управления. Л. : Машиностроение, 1988. 365 с.
13. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М. : Горячая линия-Телеком, 2009. 608 с.
14. Туманов М.П. Теория управления. Теория импульсных, дискретных и нелинейных САУ. М. : МГИЭМ, 2005. 63 с.
15. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования / пер. с англ. М.А. Берманта и Ж.Л. Грина ; под ред. Я.З. Цыпкина. М. : Физматгиз, 1963. 456 с.
16. Зырянов Г.В. О выборе максимального периода дискретности в частотном методе синтеза цифровой САУ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2010. Вып. 11. № 2. С. 33–36.
17. Tomov L., Garipov E. Choice of Sample Time in Digital PID Controllers // Technical University of Sofia,

Bulgaria. RECENT 8. 2007. No. 2 (20). Режим доступа: <http://www.recentonline.ro/020/Tomov-R20.pdf>.

18. Котельников В.А. О пропускной способности «эффира» и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук / репр., воспроизв. изд. 1933 г. 2006. Т. 176. № 7. С. 762–770.

19. Изерман Р. Цифровые системы управления / пер. с англ. М.: Мир, 1984. 541 с.

20. Волович Г.И. Аналого-цифровое измерение переменного напряжения и теорема Котельникова // Компоненты и технологии. 2010. № 7. Режим доступа: http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2010_07_144.pdf.

21. Иванов Б.А., Недвига А.В. Элементы теории дискретных систем автоматического управления. Ухта: УГТУ, 2007. 112 с.

22. Методы классической и современной теории автоматического управления : в 5 т. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления. под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. ; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.

23. Ливенцов С.Н., Ливенцова Н.В. Цифровые системы управления. Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2009. 45 с.

24. Dogan I. Microcontroller based applied digital control. John Wiley & Sons Ltd 2006. P. 313.

25. Шамриков Б.М. Основы теории цифровых систем управления. М.: Машиностроение, 1985. 296 с.

26. Худяков Г. Теорема отсчетов для цифровой обработки случайных сигналов // Компоненты и технологии. 2009. № 5. Режим доступа: http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2009_05_110.pdf.

27. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления : пер. с англ. ; 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Невский Диалект, 2001. 557 с.

28. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью / пер. с англ. Б.И. Копылова. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с.

29. Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т. Модель процесса управления скоростью движения катка // Решетневские чтения : материалы XVI междунар. науч. конф., посвящ. памяти ген. конструктора ракет-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева: в 2 ч. Красноярск : Сибир. гос. аэрокосм. ун-т, 2012. Ч. 1. С. 268–269.

Поступила в редакцию в октябре 2016 г.

Об авторах: **Прокопьев Андрей Петрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов и технологий строительства, **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82, prok1@yandex.ru;

Иванчура Владимир Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования, **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82, ivan43ura@yandex.ru;

Емельянов Юрий Тимофеевич — доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий строительства, **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82, ert-44@yandex.ru;

Сафаров Ниджат Афик — аспирант кафедры автомобильных дорог и городских сооружений, **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82, ert-44@yandex.ru.

Для цитирования: Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т., Сафаров Н.А. Особенности синтеза цифровой нелинейной системы управления с электрогидравлическим приводом // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 3 (102). С. 346–353. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.346-353

REFERENCES

1. Prokopiev A.P., Emelianov R.T. *Kompleksnaya avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov ustroystva dorozhnykh pokrytiy* [Complex Automation of Technological Processes of Road Coatings]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2011, 152 p. (In Russian)

2. Prokopiev A.P., Emelianov R.T., Ivanchura V.I. *Metody upravleniya tekhnologicheskimi processami stroitel'stva asfal'tobetonnnykh pokrytiy* [Methods of Control of Technological Processes of Construction of Asphalt Concrete Pavements]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2012, 255 p. (In Russian)

3. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Kustarev G.V., Emelianov R.T. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov dorozhnogo stroitel'stva* [Automation of Technological Processes of Road Construction]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2013, 245 p. (In Russian)

4. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelianov R.T. Oso-bennosti sinteza regul'yatora nelineynoy sistemy upravleniya [Peculiarities of the Synthesis of Controller for Nonlinear System Control]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah* MMTT-27 : *sbornik trudov XXVII Mezhdunarodnoy nauchnoy*

konferencii : v 12 t. [Mathematical Methods in Engineering and Technology MMTT-27 : Proceedings XXVII International Scientific Conference]. Tambov, Tambov State Technical University Publ., 2014, vol. 5: Section 1, 2, 5, pp. 79–83. (In Russian)

5. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I. Oso-bennosti sinteza regul'yatora elektrogidravlichesko-y sistemy upravleniya [Peculiarities of the Synthesis of Controller Electro-Hydraulic Control System]. *Trudy XII Vserossiyskoye soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [Proceedings XII All-Russia Meeting on Control Problems VCPU-2014 (Moscow, June 16–19, 2014)]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2014, pp. 307–317. (In Russian)

6. Derevickiy D.P., Fradkov A.L. *Prikladnaya teoriya diskretnykh adaptivnykh sistem upravleniya* [Applied Theory of Discrete Adaptive Control Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 216 p. (In Russian)

7. Solodovnikov V.V., Kon'kov V.G., Suhanov V.A., Shevyakov O.V. *Mikroprocessornye avtomaticheskie sistemy regulirovaniya. Osnovy teorii i elementy* [Microprocessor Automatic Control System. Fundamentals of Theory and Elements]. Moscow, Higher school Publ., 1991, 255 p. (In Russian)

8. Erofeev A.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of Automatic Control]. Saint Petersburg, Politehnika Publ., 2003, 302 p. (In Russian)
9. Polyakov K.Ju. *Osnovy teorii cifrovyykh sistem upravleniya* [Basic Theory of Digital Control Systems]. Saint Petersburg, GMTU Publ., 2006, 161 p. (In Russian)
10. Muromtsev D.Ju., Yashin E.N. *Analiz i sintez diskretnykh sistem* [Analysis and Synthesis of Discrete Systems]. Tambov, Publishing House TSTU Publ., 2011, 108 p. (In Russian)
11. Gudvin G.K., Grebe S.F., Sal'gado M.Je. *Proektirovaniye sistem upravleniya* [Design of Control Systems]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2010, 911 p. (In Russian)
12. Besekerskiy V.A., Efimov N.B., Ziatdinov S.I. *Mikroprocessornyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Microprocessor Automatic Control System]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988, 365 p. (In Russian)
13. Denisenko V.V. *Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskimi processami, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer Control of Process, Experiment, Equipment]. Moscow, Hot Line-Telecom Publ., 2009, 608 p. (In Russian)
14. Tumanov M.P. *Teoriya upravleniya. Teoriya impul'snykh, diskretnykh i nelineynykh SAU* [Management Science. The Theory of Pulsed, Discrete, and Nonlinear ACS]. Moscow, MGIE Publ., 2005, 63 p. (In Russian)
15. Dzhuiri Je. *Impul'snyye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya* [Pulse Systems of Automatic Control]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 456 p. (In Russian)
16. Zyryanov G.V. O vybere maksimal'nogo perioda diskretnosti v chastotnom metode sinteza cifrovoy CAP [About the Choice of the Maximum Period of the Discrete in the Frequency Method of Synthesis of Digital CAP]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Proceedings of South Ural State University]. 2010, no. 2, issue 11, pp. 33–36. (In Russian)
17. Tomov L., Garipov E. Choice of Sample Time in Digital PID Controllers. *RECENT*, 2007, vol. 8, no. 2 (20). Available at: <http://www.recentonline.ro/020/Tomov-R20.pdf>.
18. Kotelnikov V.A. O propusknoy sposobnosti «efira» i provoloki v elektrosvyazi [About the Channel Capacity of "Air" and Wire in Telecommunications]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Success of Physical Sciences]. 2006, vol. 176, no. 7, pp. 762–770. (Reprint, 1933). (In Russian)
19. Izerman R. *Cifrovyye sistemy upravleniya* [The Digital Control System]. Moscow, Mir Publ., 1984, 541 p. (In Russian)
20. Volovich G.I. Analogo-cifrovoye izmerenie peremennogo napryazheniya i teorema Kotelnikova [Analog-to-Digital Measurement of AC Voltage and the Kotelnikov Theorem]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technology]. 2010, no. 7. Available at: http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2010_07_144.pdf. (In Russian)
21. Ivanov B.A., Nedviga A.V. *Elementy teorii diskretnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Elements of the Theory of Discrete Automatic Control Systems]. Ukhta, USTU Publ., 2007, 112 p. (In Russian)
22. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: v 5 tt.* [Methods of Classical and Modern Automatic Control Theory]. 2nd ed., Rev. Moscow, Publishing House BMSTU Publ., 2004, Vol. 3: Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya [Synthesis of Regulators of Automatic Control Systems], 616 p. (In Russian)
23. Liventsov S.N., Liventsova N.V. *Cifrovyye sistemy upravleniya* [The Digital Control System]. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University Publ., 2009, 45 p. (In Russian)
24. Dogan I. Microcontroller Based Applied Digital Control. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2006, p. 313.
25. Shamrikov B.M. *Osnovy teorii cifrovyykh sistem upravleniya* [Basic Theory of Digital Control Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 296 p. (In Russian)
26. Hudyakov G. Teorema otschetov dlya tsifrovoy obrabotki sluchaynykh signalov. [Sampling Theorem for Digital Processing of Random Signals]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technology]. 2009, no. 5. Available at: http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2009_05_110.pdf. (In Russian)
27. Olsson G., Piani D. *Cifrovyye sistemy avtomatizatsii i upravleniya* [Digital Automation Systems and Control]. Saint Petersburg, Nevsky Dialect Publ., 2001, 557 p. (In Russian)
28. Fillips Ch., Harbor R. *Sistemy upravleniya s obratnoy svyaz'yu* [Control System with Feedback]. Moscow, Laboratory of Base Knowledge Publ., 2001, 616 p. (In Russian)
29. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelianov R.T. Model' processa upravleniya skorost'yu dvizheniya katka. [The Process Model of the Control of Speed of Motion of the Roller. Readings from Reshetnev]. *Reshetnevskie chteniya materialy XVI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketo-kosmicheskoykh sistem akademika M.F. Reshetneva: v 2 ch.* [Proceedings of the XVI International Scientific Memorial Conference by M.F. Reshetnev, a Space System Designer]. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University Publ., 2012, p. 1, pp. 268–269. (In Russian)

Received in October, 2016

About the authors: **Prokopiev Andrey Petrovich** — candidate of technical science, associate Professor, Department of Building materials and construction technology, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; prok1@yandex.ru;

Ivanchura Vladimir Ivanovich — doctor of technical science, Professor, Department of automation System, automated management and engineering, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ivan43ura@yandex.ru;

Emelianov Rurik Timofeevich — doctor of technical science, Professor, Department of Building materials and construction technology, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ert-44@yandex.ru;

Safarov Nidjat Afik — postgraduate student, Department of Roads and building, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ert-44@yandex.ru.

For citation: Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelianov R.T., Safarov N.A. Osobennosti sinteza tsifrovoy nelineynoy sistemy upravleniya s elektrogidravlicheskim privodom [Peculiarities of the Synthesis of Digital Nonlinear Control with Electrohydraulic Drive]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 3 (102), pp. 346–353. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.346-353