

# Методика синтеза цифровой системы управления дорожно-строительной машиной с гидравлическим приводом

А. П. Прокопьев<sup>1</sup>, Ж. И. Набижанов<sup>2</sup>, Р. Т. Емельянов<sup>3</sup>, В. И. Иванчура<sup>4</sup>

Сибирский федеральный университет

<sup>1</sup>prok1@yandex.ru, <sup>2</sup>jasur150691@yandex.ru, <sup>3</sup>ert-44@yandex.ru, <sup>4</sup>ivan43ura@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматривается методика синтеза цифровых регуляторов систем управления дорожно-строительной машины с электрогидравлическим исполнительным приводом, основанная на методе синтеза цифровой части системы по непрерывному прототипу и экспертном подходе.

**Ключевые слова:** дорожно-строительная машина; электрогидравлический привод; цифровая система управления; синтез регулятора; нелинейная система управления

## I. ВВЕДЕНИЕ

Методы синтеза регуляторов линейных систем управления достаточно хорошо изучены. В реальных системах автоматического управления (САУ) дорожно-строительных машин (ДСМ) в качестве исполнительных механизмов используются гидравлические приводы (ГП) имеющие признаки нелинейности: ограничение энергетических возможностей насосной установки ГП, которое приводит к нелинейности типа «ограничение» выходных сигналов.

Дорожно-строительные машины как объекты управления являются мобильными машинами, имеют преимущественно электрогидравлические приводы основных механизмов и характеризуются как динамические системы. Для автоматизации ДСМ применяются централизованные и децентрализованные микропроцессорные системы управления.

В работах [1, 2] рассмотрены задачи синтеза нелинейных систем управления на основе частотного и модального методов. Методы анализа и синтеза дискретных систем управления динамическими объектами рассмотрены во многих научных работах [3–7 и др.].

В работе [8] отмечается три возможных варианта проектирования цифровых систем управления. Для синтеза регуляторов реальных систем управления в прикладной области является метод синтеза цифровой части системы по непрерывному прототипу [9] – переоборудования непрерывного регулятора.

Непрерывные переменные удобно использовать для анализа и синтеза ПИД-регуляторов [10]. Техническая

реализация регулятора на основе контроллера или бортового компьютера, который обрабатывает переменные, полученные из аналоговых сигналов после дискретизации по времени и квантованию по уровню, предполагает переход к дискретной форме уравнений.

При проектировании САУ с достаточной разрядностью по АЦП/ЦАП квантованием по уровню можно пренебречь, при корректной оценке накопления погрешности, а квантование (дискретизацию) по времени необходимо учитывать [11]. В этом случае системы могут рассматриваться как импульсные, для которых имеется хорошо разработанный теоретический аппарат [12].

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА

Определение периода дискретизации является актуальной задачей. Ей посвящены современные научные работы [13, 14 и др.]. Теоретической базой всей цифровой обработки, хранения и передачи сигналов является теорема Котельникова [11, 15, 16, 17].

Для обеспечения точного восстановления непрерывный сигнал со спектром ограниченным максимальной частотой  $\omega_{\max}$  по последовательности его дискретных значений, необходимо, чтобы частота квантования  $\omega_0$  удовлетворяла условию

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

Тогда, для такта квантования  $T_0$ , с учетом уравнения  $\omega_0 = 2\pi/T_0$ , должно выполняться условие [19]

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

Условие (1) является результатом теоремы прерывания, сформулированной Шенноном (в российской литературе Котельниковым).

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

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

играет роль своего рода эталонной константы. Она определяет полосу пропускания дискретной системы [16]. Следует отметить, что теорема Котельникова в практических задачах никогда не выполняется из-за ограниченности временного интервала обработки сигналов [18].

Известны рекомендации [12] по назначению периода квантования, зависящее от физического характера управляемых процессов и особенностей системы. В практике реализации систем управления получило распространение следующее правило – частота квантования должна быть на порядок больше полосы существенных частот объекта [19].

В работе [14] предлагается определять диапазон периода дискретизации  $T_0$  по формуле

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

где  $T_d$  – постоянная времени дифференцирования регулятора.

В публикации [20] рациональный выбор частоты квантования для систем управления с обратной связью производится исходя из ширины полосы пропускания или из времени разгона системы. При управлении могут использоваться низкие частоты квантования, т. к. многих объектов невелики, а их постоянные времени обычно больше времени разгона замкнутой системы в 3–5 раз

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

где  $T_i$  – постоянные времени объекта управления.

В работе [21] посвященной микроконтроллерам в разделе реализация цифрового управления обобщена теория и практика выбора интервала дискретизации. Сформулированы следующие рекомендации:

- если объект управления имеет доминирующую постоянную времени  $T_p$ , тогда интервал дискретизации  $T$  для замкнутой системы можно выбрать из условия  $T < T_p / 10$ ;
- если для замкнутой системы управления время установления переходного процесса  $T_{ss}$  или собственная частота  $\omega_n$ , тогда интервал дискретизации  $T$  выбирается из условия  $T < T_{ss} / 10$  и  $\omega_s > 10\omega_n$ ,  $\omega_s = 2\pi / T$ , где  $\omega_s$  – частота дискретизации.

В научной работе В.Г. Зырянова [13] отмечается, что период (шаг) дискретизации  $T_0$  является очень важным параметром цифровой системы управления, так как от него зависят многие из коэффициентов дискретной модели «неизменяемой части» разомкнутой не скорректированной

системы автоматического регулирования (САР), 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.

Традиционно, в соответствии с рекомендациями, задают конкретное значение  $T_0$ , а затем аналитическим или частотным методом динамического синтеза цифровых САР определяют передаточную функцию цифрового корректирующего устройства  $W_{\text{цк}}(z)$ . При необходимости (например, получен слишком сложный вид  $W_{\text{цк}}(z)$ , не выполняются ограничения на показатели качества и др.) 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 цифровых САР. Так, например, в работе [22] в качестве начального приближения рекомендуется частоту дискретизации назначать примерно в шесть раз больше частоты среза непрерывной части цифровых САР.

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 математического обоснования для прикладных задач, что приводит на практике к неправомерному применению теоремы отсчетов и некорректным ее интерпретациям при цифровой обработке сигналов [23].

По формулировке Г.Олсона [24] определение адекватной частоты выборки для процесса управления представляет собой нетривиальную задачу и скорее может рассматриваться как искусство, чем наука и представляет собой компромисс между требованиями динамики процесса и производительностью компьютера и других технологических механизмов.

Анализ научных работ указывает на наличие современных проблем синтеза реальных цифровых систем управления. Особенно это проявляется при автоматизации объектов управления в прикладной области.

Цель исследования: разработка методики синтеза цифрового регулятора нелинейной системы управления линейным динамическим объектом.

Объект исследования: процесс цифровой системы управления нелинейным динамическим объектом с обратной связью.

Объект управления – дорожно-строительная машина, имеет гидравлический привод, используемый в качестве исполнительных механизмов САУ.

Научно-исследовательская задача. С целью обеспечения качества переходного процесса близкого к

апериодическому характеру изменения переходной характеристики требуется разработать метод параметрического синтеза цифрового регулятора нелинейной системы управления линейным объектом. Задача синтеза цифрового регулятора решается в прикладной области систем управления ДСМ. При синтезе регулятора необходимо учесть значительную инерционность гидравлического привода 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.

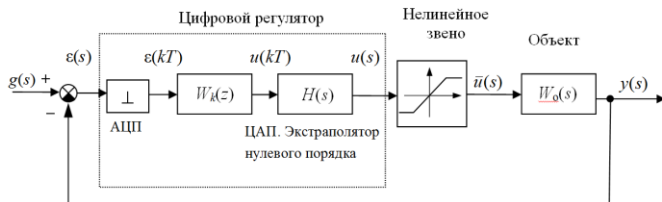


Рис. 1. Структурная схема цифровой нелинейной системы управления

На рис. 1 использованы следующие обозначения:  $W_o(s)$  – 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.

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

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

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

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

Величина насыщения и вид используемой нелинейной характеристики обусловлены особенностями конструкции применяемого гидравлического насоса – регулируемого, нерегулируемого. Управление осуществляется изменением величины управляющего сигнала давлением насоса.

При нулевых начальных условиях диапазон изменения величины сигнала задающего блока на систему определяется ограничением выходной переменной нелинейного элемента единичным отрицательным, либо положительным значениями. Тогда, заданное значение выходной регулируемой переменной (в рассматриваемом случае, скорости вращения гидромотора) также ограничено значениями коэффициента передачи передаточной функции объекта управления  $W_o(0)$ . Это не противоречит практике. Поэтому

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

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

$$|\Delta y(t)| \leq W_o(0), \quad (3)$$

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

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

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

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

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

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

### III. МЕТОДИКА СИНТЕЗА ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

При синтезе цифрового регулятора решается задача переоборудования, заключающаяся в замене непрерывного регулятора цифровым, с сохранением важнейших свойств непрерывной системы, рис. 1.

С учетом наличия нелинейностей ГП, значительной инерционности систем ГП, применяемого в ДСМ, предлагается следующий алгоритм методики синтеза цифровых САУ, основанный на концепции переоборудования непрерывного регулятора.

Шаг 1. Регулятор синтезируется как непрерывный по известным методикам, в том числе опубликованным авторами статьи в трудах международной конференции ММТТ-27 (2014 г.) и всероссийского совещания ВСПУ-2014 [1, 2].

Шаг 2. Выполняется переход к цифровому варианту регулятора по известному выражению [24] дискретной передаточной функции

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

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;  $\varepsilon$  – входная переменная цифрового ПИД-регулятора (ошибка регулирования); коэффициенты

$$a = (K_p + K_i T + K_d T^{-1}); \quad b = -(K_p + 2K_d T^{-1}); \quad c = K_d T^{-1}.$$

Частота дискретизации берется больше, чем полоса пропускания непрерывной системы управления ГП. Насколько больше определяется из дальнейшего компьютерного моделирования и экспертной оценки получаемых результатов. Как отмечается в работе Г. Олссона [24], выбор частоты скорее искусство, подкрепленное инженерной интуицией и практическим опытом.

Шаг 3. Компьютерное 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 [25].

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика синтеза цифровой системы управления с электрогидравлическим приводом, характерным для строительных и дорожных, сельскохозяйственных и других мобильных машин. Требуемое качество процесса управления обеспечивается рациональным определением частоты дискретизации цифрового регулятора замкнутой системы. В основе методики положен следующий постулат: частота дискретизации берется больше, чем полоса пропускания непрерывной системы управления гидравлическим приводом. Насколько больше определяется из дальнейшего моделирования и оценки получаемых результатов. Достоинством метода является возможность организации диалоговых процедур проектирования цифровых регуляторов систем автоматического управления. Этапы построения параметров регулятора могут быть наиболее эффективно реализованы в программной среде MATLAB&Simulink.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т. Особенности синтеза регулятора нелинейной системы управления // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ-27: XXVII международная научная конференция: сборник трудов. Секция 2 / Мин-во образования и науки Российской Федерации, Тамбовский гос. техн. ун-т [и др.]. Тамбов : [б. и.], 2014.
- [2] Прокопьев А.П., Иванчура В.И. Особенности синтеза регулятора электрогидравлической системы управления // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 307-317.
- [3] Деревицкий Д.П., Фрадков А.Л. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления. М.: Наука, 1981. 216 с.
- [4] Солодовников В.В., Коньков В.Г., Суханов В.А., Шевяков О.В. Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы. М.: Высшая школа, 1991. 255 с.
- [5] Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. СПб. : Политехника, 2003. 302 с.
- [6] Поляков К.Ю. Основы теории цифровых систем управления. СПб. : ГМТУ, 2006. 161 с.
- [7] Муромцев Д.Ю., Яшин Е.Н. Анализ и синтез дискретных систем. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. 108 с.
- [8] Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 911 с.
- [9] Бесекерский В.А., Ефимов Н.Б., Зиятдинов С.И. Микропроцессорные системы автоматического управления. Л.: Машиностроение, 1988. 365 с.
- [10] Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 608 с.
- [11] 14. Туманов М.П. Теория управления. Теория импульсных, дискретных и нелинейных САУ. М.: МГИЭМ., 2005. 63 с.
- [12] Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования. М.: Физматгиз, 1963. 456 с.
- [13] Зырянов Г.В. О выборе максимального периода дискретности в частотном методе синтеза цифровой САУ // Вестник ЮУрГУ. №2. Выпуск 11. 2010. С. 33-36.
- [14] Tomov L., Garipov E. Choice of Sample Time in Digital PID Controllers / RECENT, Vol. 8, nr. 2 (20), July, 2007. URL: <http://www.recentonline.ro/020/Tomov-R20.pdf>.
- [15] Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи. В. кн.: Материалы по радиосвязи к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции связи. Всесоюзный энергетический комитет. 1933.
- [16] Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.
- [17] Волович Г.И. Аналого-цифровое измерение переменного напряжения и теорема Котельникова // Компоненты и технологии. №7, 2010. URL: [http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2010\\_07\\_144.pdf](http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2010_07_144.pdf).
- [18] Иванов Б.А., Недвига А.В. Элементы теории дискретных систем автоматического управления. Ухта: УГТУ, 2007. 112 с.
- [19] Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.
- [20] Ливенцов С.Н., Ливенцова Н.В. Цифровые системы управления. Томск: Изд-во Томского политех. университета, 2009. 45 с.
- [21] Dogan I. Microcontroller based applied digital control. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2006. P. 313.
- [22] Шамиров, Б.М. Основы теории цифровых систем управления. М.: Машиностроение, 1985. 296 с.
- [23] Худяков Г. Теорема отсчетов для цифровой обработки случайных сигналов / Компоненты и технологии. № 5. 2009. URL: [http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2009\\_05\\_110.pdf](http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2009_05_110.pdf).
- [24] Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. 557 с.
- [25] Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. 616 с.