

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Беляков С.Л., Диденко Д.А., Самойлов Д.С.* Адаптивная процедура управления представлением рабочей области электронной карты // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 121-127.
2. *Берштейн Л.С., Боженьюк А.В.* Оценка степени изоморфизма на основе нечетких множеств внутренней устойчивости и клик нечетких графов // Программные продукты и системы. – 2002. – № 1. – С. 12-15.
3. *Bershtein L.S., Bozhenuk A.V.* Maghouth Method for Determination of Fuzzy Independent, Dominating Vertex Sets and Fuzzy Graph Kernels // International Journal of General Systems. – 2001. – Т. 30, № 1. – С. 45-52.
4. *Беляков С.Л., Белякова М.Л., Самойлов Д.С.* Геоинформационный сервис ситуационного центра // Информационные технологии. – 2011. – № 8. – С. 29-32.
5. *Берштейн Л.С., Беляков С.Л., Боженьюк А.В.* Использование нечетких темпоральных графов для моделирования в ГИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 121-127.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.А. Башков.

Беляков Станислав Леонидович – Научно-технический центр «Информационные технологии» федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: beliacov@yandex.ru; 347922, г. Таганрог, Октябрьская пл., 4; тел.: 84959677701; д.т.н.; с.н.с.

Белякова Марина Леонтьевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: asni@fep.tti.sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: +78634371638; кафедра информационных измерительных технологий и систем; к.т.н.; доцент.

Розенберг Игорь Наумович – ОАО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт инженеров железнодорожного транспорта» (НИИАС); e-mail: I.kudreyko@gismps.ru; 109029, Москва, ул. Нижегородская, 27, стр. 1; тел.: 84959677701; д.т.н.; зам. генерального директора.

Beliacov Stanislav Leonidovich – Scientific and Technical Center «Information Technologies» of Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»; e-mail: beliacov@yandex.ru; 4, Oktyabr'skaya sq., Taganrog, 347922, Russia; phone: +74959677701; dr. of eng. sc.; senior scientist.

Beliacova Marina Leontyevna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: asni@fep.tti.sfedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371638; the department of information technology and systems test; cand. of eng. sc.; associate professor.

Rozenberg Igor Naymovich – Public corporation “Research and development institute of railway engineers”; e-mail: I.kudreyko@gismps.ru; 27/1, Nizhegorodskaya, Moscow, 109029, Russia; phone: +74959677701; dr. of. eng. sc.; deputy director.

УДК 681.51.01

А.В. Семенов, А.Р. Гайдук, Ю.А. Гелож

**АЛГОРИТМ РАБОТЫ ДВУМЕРНОГО ЦИФРОВОГО УСТРОЙСТВА
УПРАВЛЕНИЯ**

Рассматривается двумерное устройство управления, на вход которого поступают два цифровых сигнала и подвергаются отдельной линейной цифровой обработке. Управляющее воздействие на выходе двумерного устройства управления формируется в результате линейной комбинации обработанных цифровых сигналов. Синтезируемая система с

таким регулятором называется система с управлением по выходу и по воздействиям. Определяется двумерное устройство управление методом аналитического синтеза по заданным показателям качества, предъявляемым синтезируемой системе.

В работе получен алгоритм работы двумерного цифрового устройства управления в виде разностного уравнения, которое определяет управление как функцию предыдущих значений задающего воздействия, управляемой переменной и управления. Получена структурная схема алгоритма вычисления управляющего воздействия, в котором используются элементарные арифметические операции умножения и сложения. Поучено выражение для определения количества действительных операций, которые необходимо выполнить для расчета текущего отсчета управления в цифровом регуляторе при аппаратной реализации.

Двумерное устройство управления; цифровое управление; алгоритм; цифровой регулятор.

A.V. Semenov, A.R. Gaiduk, Y.A. Gelozhe

METHOD OF GENERATION OF DESIRED TRANSFER FUNCTION OF DISCRETE SYSTEMS WITH HIGH-ORDER ASTATICISM

In the given paper two-degree-of freedom control device is considered. On the input of this device two digital signals arrive and are subject to separate linear digital processing. Control action on the output of two-degree-of freedom control device is generated by a linear combination of the processed digital signals. Synthesized system with this controller is called a system with controlled output and impact. Two-degree-of freedom device management method for the synthesis of a given analytical performance quality requirements of the synthesized system is described.

An algorithm of two-degree-of freedom digital control device in the form of differential equations, which defines control as a function of the previous values of the reference variable, controlled variable and management is gained. A block diagram of the control action calculation algorithm, which uses basic arithmetic operations of addition and multiplication is developed. The expression to determine the number of actual operations to be performed to calculate the current frame on the digital controller for hardware implementation is suggested.

Two-degree-of freedom control device; digital control; algorithm; digital controller.

Введение. В настоящее время актуальной является задача разработки дискретных устройств управления, реализуемых на современных микроконтроллерах, микропроцессорах и специализированных ЭВМ. При технической реализации дискретных устройств управления результатом синтеза дискретных систем управления является алгоритм вычисления управляющего воздействия, поступающего на объект управления. На ранних стадиях проектирования систем управления, таких как техническое предложение, эскизный проект, особенно важным для проектировщиков является возможность оценки требований по быстродействию к вычислителью. Исходными данными для такой оценки является количество действительных операций, таких как умножение и сложение, которые можно получить, записав алгоритм работы цифрового устройства управления (ЦУУ). Основной сложностью при этом является то, что затруднительно записать алгоритм работы не проведя синтез системы. В работе ставится задача описать алгоритм работы двумерного ЦУУ в общем виде, которое можно получить методом аналитического синтеза по заданным показателям качества, описанного в работах [1, 2, 3, 4].

Описание системы управления. При аналитическом синтезе указанным методом предполагается, что в соответствии с техническим заданием необходимо синтезировать систему управления с заданными показателями качества такими, как порядок астатизма по задающему воздействию, определяющий ошибку системы управления в установившемся режиме, время регулирования и перерегулирование. Результатом синтеза является алгоритм работы ЦУУ в виде разностного уравнения, при котором указанные показатели качества синтезированной замкнутой системы будут не хуже заданных.

Согласно предлагаемому методу синтеза на вход ЦУУ поступают два цифровых сигнала: задающее воздействие g_k и управляемая переменная y_k [2, 4]. Такое устройство управления в отечественной литературе называется двумерным [1], в зарубежной – «two-degree-of-freedom» [1], а синтезируемая система – с управлением по выходу (y_k) и по воздействиям (g_k) [1]. С выхода ЦУУ управление u_k поступает на дискретный объект управления (ДОУ), как показано на рис. 1.

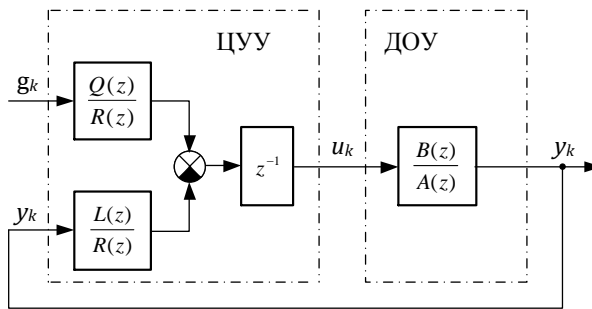


Рис. 1. Структурная схема синтезируемой дискретной системы с двумерным устройством управления

Особенностью синтезируемого двумерного ЦУУ является то, что на его вход поступают два цифровых сигнала, которые подвергаются отдельной линейной обработке. Входные сигналы ЦУУ могут быть в следующих комбинациях: задающее воздействие g_k и управляемая переменная y_k , как на рис.1; задающее воздействие g_k и сигнал рассогласования (ошибки) ε_k ; сигнал рассогласования (ошибки) ε_k и управляемая переменная y_k . Управляющее воздействие на выходе ЦУУ формируется в результате линейной комбинации обработанных цифровых сигналов.

Здесь задающее воздействие g_k поступает от внешнего по отношению к синтезируемой дискретной системе цифрового задающего устройства. Управляемая переменная y_k является измеряемой величиной.

Согласно рис. 1 уравнение «вход-выход» ЦУУ с учетом запаздывания на период запишется так:

$$R(z)u(z) = Q(z)z^{-1}g(z) - L(z)z^{-1}y(z), \quad (1)$$

где $R(z)$, $Q(z)$, $L(z)$ – полиномы ЦУУ, которые определяются в результате решения задачи синтеза [1, 2, 4].

Множитель z^{-1} в правой части (1) учитывает запаздывание на такт, возникающие в ЦУУ из-за затрат времени на вычисление и передачу по интерфейсу в ДОУ текущего отчета управления u_k , и определяет относительную степень регулятора [1], которая в данном случае задана равной $\mu_y^* = 1$. Для удобства введем обозначения $r = \deg R(z)$, $q = \deg Q(z)$, $l = \deg L(z)$, где \deg – значение порядка соответствующего полинома. Тогда условия физической реализуемости уравнений «вход-выход» (1) имеют вид [1, 2, 4]

$$r \geq l, \quad r \geq q. \quad (2)$$

Для синтеза дискретных систем управления, реализуемых на современных микропроцессорах и специализированных ЭВМ, необходимы дискретные модели ОУ $W_{yu}(z)$, которые получаются путем Z_T -преобразования передаточных функций непрерывных ОУ при некотором периоде дискретизации T [2, 4, 5]. Уравнение «вход-выход» объекта управления в z -изображениях представим в виде

$$A(z)y(z) = B(z)u(z). \quad (3)$$

Синтез устройства управления проводится при известном объекте управления, поэтому в дальнейшем будем считать, что полиномы из (3) известны. Обозначим $n = \deg A(z)$, $m = \deg B(z)$.

Алгоритм работы ЦУУ. Искомый алгоритм работы ЦУУ, структурная схема которого видна из рис. 1, ищется в виде разностного уравнения, решение которого определяет управление u_k как функцию предыдущих значений задающего воздействия, управляемой переменной и управления, т.е. $u_k = (g_{k-i}, y_{k-i}, u_{k-i})$ $\forall k > 1, i = 1, 2, \dots$ при нулевых начальных условиях [6].

Представим полиномы $R(z)$, $L(z)$, $Q(z)$ в виде:

$$R(z) = \rho_0 + \rho_1 z + \dots + \rho_r z^r = \sum_{i=0}^r \rho_i z^i; \quad (4)$$

$$L(z) = \tilde{L}(z) = \lambda_0 + \lambda_1 z + \dots + \lambda_l z^l = \sum_{i=0}^l \lambda_i z^i; \quad (5)$$

$$Q(z) = \varphi_0 + \varphi_1 z + \dots + \varphi_q z^q = \sum_{i=0}^q \varphi_i z^i. \quad (6)$$

С учетом обозначений (4), (5), (6) уравнение ЦУУ (1) примет вид

$$\sum_{i=0}^r \rho_i z^i \cdot u(z) = \sum_{i=0}^q \varphi_i z^i \cdot z^{-1} g(z) - \sum_{i=0}^l \lambda_i z^i \cdot z^{-1} y(z). \quad (7)$$

Умножить обе части полученного уравнения (7) на z^{-r} . В результате получим

$$\sum_{i=0}^r \rho_{r-i} z^{-i} \cdot u(z) = \sum_{i=0}^q \varphi_{q-i} z^{-i} \cdot z^{-1} g(z) - \sum_{i=0}^l \lambda_{l-i} z^{-i} \cdot z^{-1} y(z). \quad (8)$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} u(z) &\rightarrow u_k = u(kT); \\ z^{-1}u(z) &\rightarrow u_{k-1} = u(kT - 1T); \\ &\vdots \\ z^{-i}u(z) &\rightarrow u_{k-i} = u(kT - iT), \end{aligned} \quad (9)$$

перейдем в выражении (8) к оригиналам, перенесем в правую часть все слагаемые, кроме u_k (текущего отсчета управления), и в результате получим

$$u_k = \rho_r^{-1} \left[\sum_{i=0}^q \varphi_{q-i} g_{k-i-1} - \sum_{i=0}^l \lambda_{l-i} y_{k-i-1} - \sum_{i=1}^r \rho_{r-i} u_{k-i} \right]. \quad (10)$$

Полученное разностное уравнение (10) определяет управление u_k как функцию предыдущих значений задающего воздействия, управляемой переменной и управления. Выражение (10) представляет собой искомый алгоритм работы ЦУУ.

Алгоритму работы ЦУУ, описываемому выражением (10), соответствует структурная схема алгоритма вычисления управления u_k , приведенная на рис. 2.

В тех случаях, когда измеряемыми являются g_k и ε_k или y_k и ε_k , уравнение (1) или соответствующее ему разностное уравнение преобразовывают соответствующим образом. Если по условиям синтеза измеряются, например, переменные y и ε , то, заменив в выражении (1) g по формуле $g = \varepsilon + y$ [1], получим следующее уравнение «вход-выход» ЦУУ:

$$R(z)u(z) = Q(z)z^{-1}\varepsilon(z) - (L(z) - Q(z))z^{-1}y(z). \quad (11)$$

В том случае, когда измеряются переменные g и ε , то, заменив в выражении (1) y по формуле $y = \varepsilon - g$ [1], получим следующее уравнение «вход-выход» ЦУУ:

$$R(z)u(z) = (Q(z) + L(z))z^{-1}g(z) - L(z)z^{-1}\varepsilon(z). \quad (12)$$

Отметим, что в выражениях (11) и (12) полиномы $R(z)$, $Q(z)$, $L(z)$ те же, что и при описании алгоритма (10). Переходя к оригиналам в выражениях (11) и (12) нетрудно получить выражения, подобные (10).

Таким образом, получено разностное уравнение и структура алгоритма работы двумерного ЦУУ. Из выражения (10) и рис. 1 нетрудно видеть, что для вычисления текущего отсчета управления u_k необходимо выполнить $N_y = r + q + l + 3$ операций умножения, $N_c = r + q + l + 2$ операций сложения, т.е. необходимо выполнить всего $N_d = 2(r + q + l) + 5$ действительных операций. Согласно методу аналитического синтеза можно определить параметры ЦУУ r , q , l на основе анализа передаточной функции ДОУ и желаемой передаточной функции синтезируе-

мой дискретной системы, обеспечивающей заданные показатели качества, не проводя полного синтеза системы. Поэтому, зная по паспорту или экспериментально время выполнения элементарных арифметических операций цифровой элементной базы, на которой разрабатывается ЦУУ, нетрудно определить временные затраты на вычисление управления в текущем такте работы цифрового регулятора и, тем самым, определить требуемую производительность аппаратного вычислителя.

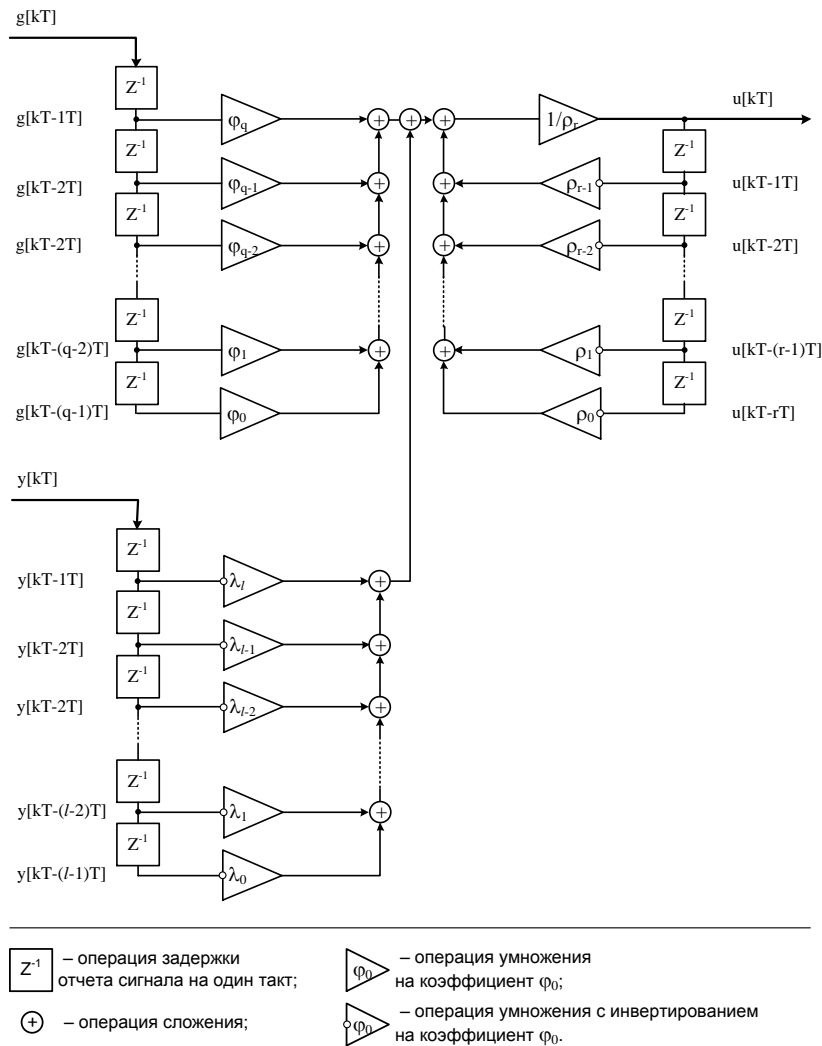


Рис. 2. Структурная схема алгоритма вычисления управления u_k в цифровом двумерном устройстве управления

Заклучение. Разработанный алгоритм двумерного устройства управления позволяет аппаратно реализовывать цифровые регуляторы с использованием современной цифровой элементной базы на основе микропроцессоров, микроконтроллерах, ЭВМ и ПЛИС. Получены две формы представления алгоритма работы: аналитическая – в виде разностного уравнения для вычисления текущего отсчета управления, и графическая – в виде структурной схемы алгоритма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.
2. *Семенов А.В., Гайдук А.Р.* Синтез дискретных неминимально-фазовых следящих систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 2 (127). – С. 53-59.
3. *Семенов А.В., Гайдук А.Р.* Метод построения желаемых передаточных функций дискретных систем с высоким порядком астатизма // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 14-20.
4. *Семенов А.В.* Синтез цифрового устройства управления следящей системы с неминимально-фазовым объектом // Материалы Всероссийской научной конференции «Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем» («Системотехника-2011»). – Таганрог, 2011. – С. 143-150.
5. *Семёнов А.В., Гайдук А.Р., Гелозе Ю.А.* Математическая модель моментного электропривода // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 5 (94). – С. 251-257.
6. *Семенов А.В.* Алгоритм работы двумерного цифрового регулятора мехатронной следящей системы. Микроэлектронные информационно-управляющие системы и комплексы: Материалы Международной молодежной конференции в рамках фестиваля науки. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. – С. 58-63.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Тарарыкин.

Гайдук Анатолий Романович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; 347904, г. Таганрог, ул. Слесарная, 26, кв. 2; тел.: 88634626287; кафедра систем автоматического управления; д.т.н.; профессор.

Гелозе Юрий Андреевич – 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 22; тел.: 88634371637; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; к.т.н.; профессор кафедры.

Семенов Александр Валерьевич – Научно-конструкторское бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета; e-mail: semenov-av@gambler.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634312350; ведущий конструктор.

Gaiduk Anatoly Romanovich – State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; 26, Slesarnaya street, app. 2, Taganrog, 347904, Russia; phone: +78634626287; the department of automatic control systems dr. of eng. sc.; professor.

Gelozhe Yuriy Andreevich – 22, Chekhova street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371637; the department of radio engineering & telecommunication systems; cand. of eng. sc.; professor of department.

Semenov Alexander Valerevich – Digital Signal Processing Design Bureau Southern Federal University; e-mail: semenov-av@rambler.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634312350; leading designer.