УДК 681.51

П.П. Кравченко

ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИ СИСТЕМНЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯХ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ ДЕЛЬТА-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА

В работе рассматриваются особенности применения оптимизированных Д-преобразований второго порядка для решения задач синтеза алгоритмов цифрового автоматического управления :

- для линейных и нелинейных стационарных и нестационарных (с численно определенными переменными во времени параметрами) объектов при неизмеряемых возмущающих воздействиях;
- для объектов с параметрической и частичной структурной неопределенностями.

Применение предлагаемой методологии для линейных и нелинейных нестационарных объектов характеризуется новыми важными для практического использования комплексными возможностями, в значительной мере раскрытыми в [1]: цифровое управление (с дискретным шагом); единая инженерная методика синтеза для линейных и нелинейных объектов; обеспечение асимптотической устойчивости; быстродействие (при ограничениях в виде значений параметров c_j^*, $j = \overline{1,n}$), соответствующее оптимальному быстродействию эквивалентной системы с объектом, модель которого включает два последовательно включенных интегрирующих звена; реализация оптимизированного по быстродействию и точности управления на основе единого алгоритма; получение гарантированных показателей качества (точности, длительности переходных процессов) на конечных интервалах при отсутствии или слабом проявлении внешних возмущающих воздействий; оптимизация по точности с адаптацией к произвольным по характеру изменения ограниченным (неконтролируемым) возмущающим воздействиям, квазиоптимальное соотношение между точностью, быстродействием и внешними возмущающими воздействиями; использование для управления измеряемой ошибки (без производных ошибки); управление объектом, уравнения движения которого содержат ограниченные нестационарные параметры; простота синтеза, расчета параметров и представления самих алгоритмов управления; приспособленность теории и алгоритмов для объектов, описываемых дифференциальными или разностными уравнениями; проведение синтеза алгоритмов управления на основе исходных (реальных) уравнений движения; оперирование с постоянно изменяющимися задающими воздействиями; использование для широкого круга объектов и некоторые другие.

Развитие отмеченной выше методологии позволило эффективно решать некоторые задачи синтеза алгоритмов управления для систем со структурной и параметрической неопределенностями. В частности, в рамках данной статьи показана возможность организации цифрового управления с гарантированными показателями качества для объекта с частичной структурной неопределенностью, представлена алгоритмически простая методика синтеза алгоритмов управления для систем с параметрической и частичной структурной неопределенностями, обращено внимание на помехоустойчивость системы (способность обеспечивать достаточные качественные характеристики при действии помех без использования фильтра), возможность обеспечения определенного уровня помехоустойчивости путем варьирования одним из коэффициентов алгоритма управления.

Синтез алгоритмов цифрового управления для линейных и нелинейных нестационарных объектов при неконтролируемых возмущающих воздействиях. Будем рассматривать объекты управления, исходные (реальные) уравнения движения которых описывают управляемый процесс (по крайней мере для ограниченных областей изменения управляющих воздействий и координат состояния) и могут быть приведены для *i*-го шага к следующему виду:

$$\ddot{x}_{ji}(t)=\varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t);x_{ki}(t);\dot{x}_{ki}(t);\ddot{x}_{ki}(t);U_{ki}(t);t\right)-G_{ji}(t);\ j=\overline{1,n};$$
$$k=\overline{1,n};\ t\in[t_{i-1};t_i],\ i=1,2,\ldots, \tag{1}$$

где $x_{ji}(t),\ \dot{x}_{ji}(t),\ \ddot{x}_{ji}(t)$ – значения *j*-ой координаты состояния объекта и ее производных на *i*-ом шаге; $\overline{P}_{ki}(t)$ - множества конечной размерности известных стационарных или в общем случае нестационарных параметров; $U_{ki}(t)$ - управляющие воздействия; $G_{ji}(t)$ – неизвестные (неконтролируемые) приведенные внешние возмущающие воздействия; $x_{j0}=x_j(t=t_0);\ \dot{x}_{j0}=\dot{x}_j(t=t_0)$ – начальные значения координат состояния.

Вводим в рассмотрение задающие воздействия $y_{зад.ji}(t)$ и оцениваем ошибку управления $z_{ji}(t)$=$x_{ji}(t)$-$y_{зад.ji}(t)$; $z_{ji}(t),\ \dot{z}_{ji}(t),\ \ddot{z}_{ji}(t)$ - значения *j*-ой координаты ошибки и ее производных.

Если хотя бы в какой-нибудь момент времени *t* координаты состояния принимают значения $x_{ji}(t)=y_{зад.ji}(t),\ \dot{x}_{ji}(t)=\dot{y}_{зад.ji}(t),\ \ddot{x}_{ji}(t)=\ddot{y}_{зад.ji}(t)$, то для этого момента управляющие воздействия $U_{ji}(t)$ и возмущающие воздействия $G_{ji}(t)$ можно принять равными нулю, и уравнения движения (1) записать в виде:

$$\ddot{y}_{зад.ji}(t)=\varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t);y_{зад.ki}(t);\dot{y}_{зад.ki}(t);\ddot{y}_{зад.ki}(t);t\right);\ j=\overline{1,n};$$
$$k=\overline{1,n};\ t\in[t_{i-1};t_i],\ i=1,2,\ldots \tag{2}$$

Вычтем из системы (1) систему (2) и получаем описание модели, необходимое для последующего использования:

$$\ddot{z}_{ji}(t)=\varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t);x_{ki}(t);\dot{x}_{ki}(t);\ddot{x}_{ki}(t);U_{ki}(t);t\right)-$$
$$-\varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t);y_{зад.ki}(t);\dot{y}_{зад.ki}(t);\ddot{y}_{зад.ki}(t);t\right)-G_{ji}(t); \tag{3}$$
$$j=\overline{1,n};\ k=\overline{1,n};\ t\in[t_{i-1};t_i],\ i=1,2,\ldots$$

Обозначим

$$\ddot{Y}_{ji}(t)=\varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t);x_{ki}(t);\dot{x}_{ki}(t);\ddot{x}_{ki}(t);U_{ki}(t);t\right)-$$
$$-\varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t);y_{зад.ki}(t);\dot{y}_{зад.ki}(t);\ddot{y}_{зад.ki}(t);t\right); \tag{4}$$
$$j=\overline{1,n};\ k=\overline{1,n};\ t\in[t_{i-1};t_i],\ \ i=1,2,\ldots$$

и, предполагая численную определенность $\ddot{Y}_{ji}(t)$, в дальнейшем считаем, что для рассматриваемых управляемых процессов (1), (3), по крайней мере, в ограниченных областях существует и единственно решение системы уравнений (4) относительно $U_{ji}(t)$, $j=\overline{1,n}$, $t\in[t_{i-1}; t_i]$, i=1,2,...

Теперь система (3) принимает вид

$$\ddot{z}_{ji}(t)=\ddot{Y}_{ji}(t)-G_{ji}(t);\; j=\overline{1,n};\; k=\overline{1,n};\; t\in[t_{i-1};t_i] \qquad (5)$$

и по уравнениям $j=\overline{1,n}$ совпадает с формой представления исходного дифференциального уравнения дельта-преобразований второго порядка, для которого определены двоичные и троичные алгоритмы оптимизированных по быстродействию и точности преобразований, качественные оценки, возможности работы с адаптацией к произвольным неконтролируемым внешним возмущениям и некоторые другие теоретические и рекомендательные для практического использования результаты [1,2].

Следующий этап решения данной задачи синтеза связан с определением для (i+1)-го шага управляющих воздействий $U_{j,i+1}(t)$, $t\in[t_i; t_{i+1}]$ на основе (4). Вводим запись (4) для (i+1)-го шага и определяем (в общем случае в неявном виде):

$$\left.\begin{array}{l} U_{j,i+1}(t)=\Phi_{j,i+1}\Big(\overline{P}_{k,i+1}(t);\, x_{k,i+1}(t);\; \dot{x}_{k,i+1}(t);\, \ddot{x}_{k,i+1}(t);\, y_{зад.k,i+1}(t); \\ \dot{y}_{зад.k,i+1}(t);\, \ddot{y}_{зад.k,i+1}(t);\; U_{k,i+1}(t);\ddot{Y}_{k,i+1};\nabla t\Big);\quad t\in[t_i,t_{i+1}];\quad j=\overline{1,n};\qquad k=\overline{1,n}. \end{array}\right\} \qquad (6)$$

Для реального обеспечения теоретического значения $\ddot{Y}_{j,i+1}(t)=const$ на (i+1)-ом шаге необходимо определять такие $U_{j,i+1}(t)$ в каждый момент времени $t\in[t_i; t_{i+1}]$, чтобы было выполнено указанное условие. Практически для цифрового управления нужно говорить о разбиении при необходимости шага ∇t, т.е. $[t_i; t_{i+1}]$, на такое количество r более мелких шагов $\nabla\tau$ ($\nabla t=r\cdot\nabla\tau$; $\tau=\nabla\tau\cdot\sigma$; $t_{i+1,\sigma}=t_i+\nabla\tau\cdot\sigma$; $\sigma=0,1,2,...,r$), при котором влияние изменяющихся в правой части (6) переменных оказывается достаточно слабым (в частном случае возможно r=1). Влияние остаточных возможных реальных отклонений $\ddot{Y}_{j,i+1,\sigma}(t)$, $t\in[t_i; t_{i+1}]$ от требуемого значения можно рассматривать как дополнительные приведенные к внешним возмущающие воздействия в (5) и соответственно в (1). Значения координат $x_{k,i+1}(t)$ и ее производных для правой части (6) могут быть определены с использованием прогнозирующих формул расчета, приведенных в [1].

Теперь для управляющих воздействий (6) можно записать:

$$\left.\begin{array}{l} U_{j,i+1,\sigma}=\Phi_j\big(\overline{P}_{k,i+1,\sigma};x_{k,i+1,\sigma};\dot{x}_{k,i+1,\sigma};\ddot{x}_{k,i+1,\sigma};y_{зад.k,i+1,\sigma};\dot{y}_{зад.k,i+1,\sigma};\ddot{y}_{зад.k,i+1,\sigma};U_{k,i+1,\sigma};\ddot{Y}_{k,i+1};\nabla t\big), \\ j=\overline{1,n};\; k=\overline{1,n};\; \sigma=\overline{1,r}. \end{array}\right\} \qquad (7)$$

Для разрешаемых относительно $U_{j,i+1}(t)$ ($U_{j,i+1,\sigma}$) уравнений могут применяться прямые методы; для неразрешаемых - методы решения систем уравнений в неявной форме. Обращаем внимание на то, что известные переменные (нестационарные) параметры $\overline{P}_{k,i+1,\sigma}$ входят в правую вычисляемую часть (7).

Решение задачи адаптивной оптимизации по точности в условиях действия неизмеряемых произвольных по характеру изменения возмущающих воздействий базируется на исследовании точностных характеристик Д-преобразования при наихудших воздействиях и определении на основе минимаксного критерия значений параметров c^*_{js}, которые обеспечивают минимум среднему по модулю значению ошибки на определенных интервалах изменения независимой переменной t [1].

Уравнения (5) по своей структуре являются линейными второго порядка. При использовании алгоритмов Д-преобразований, отсутствии ограничений на управляющие воздействия и координаты состояния, отсутствии постоянно действующих внешних возмущающих воздействий и при однозначной определенности для всего фазового пространства значений $\ddot{Y}_{ji}$ траектории движения описывают оптимальный по быстродействию процесс, для которого гарантируется не только ограниченность, но и минимальность длительности перехода из данной точки фазового пространства в начало координат (длительность определяется, в частности, значением модуля кванта модуляции). При допустимых внешних воздействиях длительность переходных процессов также ограничена. Такие линейные системы характеризуются асимптотической устойчивостью в целом. Рассматриваемая существенно более общая задача (3) связана с (5) через соотношения (4) или (6), (7). В связи с реализацией этих соотношений, в которых должны при необходимости учитываться ограничения на управляющие воздействия, координаты состояния, существование и единственность решения относительно управляющего воздействия (в области управляемости), возможно выявление ограничений области фазового пространства (или выявление несуществования этой области), в которой свойства асимптотической устойчивости уравнений (5) сохраняются и для уравнений (3), (1). Математическое решение данной задачи с учетом всех ограничений для сложных уравнений движения может представлять собой существенную проблему. В этом случае при необходимости эффективным инструментом для выбора параметров $c_j^*, j=\overline{1,n}$,∇t с учетом ограничений и определения области асимптотической устойчивости (области управляемости) в фазовом пространстве является моделирование на ЭВМ.

В целом сущность рассмотренной методологии синтеза алгоритмов управления состоит в том, что формируется процесс управления, эквивалентный процессу оптимизированного Д-преобразования второго порядка (оптимального по быстродействию и точности цифрового управления объектом, описание которого включает последовательность двух интегрирующих звеньев). Интересной особенностью применения Д-преобразований для управления является, в частности, то, что для различных объектов имеют место фактически шаблонные характеристики для областей асимптотической устойчивости, качественные оценки и рекомендации, которые могут быть априорно использованы при синтезе цифровой системы. При этом базовыми являются, например, простейшие соотношения для оценки гарантированных значений показателей качества при отсутствии (или слабом влиянии) внешних возмущений и постоянстве (или медленном изменении) c_j^*:

- количество шагов переходного процесса ($\dot{z}_j(t_0) \approx 0$):

$$\mathrm{R}_{j,пер} \approx 2 \cdot \sqrt{\frac{\left|z_j(t_0)\right|}{c_j^*}}, j=\overline{1,n}; \tag{8}$$

- длительность переходного процесса:

$$T_{j,пер} \approx R_{j,пер} \nabla t; \tag{9}$$

- ошибка установившегося процесса (для двоичного алгоритма):

$$\left| z_j(t) \right| <\approx c_j^*. \tag{10}$$

Синтез алгоритмов цифрового управления для объектов с частичной структурной неопределенностью. Будем рассматривать объекты управления, уравнения движения которых описывают управляемый процесс (как и в разделе1, по крайней мере для ограниченных областей изменения управляющих воздействий и координат состояния) и могут быть приведены для i-го шага к следующему виду:

$$\begin{aligned} &\ddot{z}_{ji}(t) = \varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t); x_{ki}(t); \dot{x}_{ki}(t); \ddot{x}_{ki}(t);; t\right) - \varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t); y_{зад.ki}(t); \dot{y}_{зад.ki}(t); \ddot{y}_{зад.ki}(t); t\right) + \\ &+ U_{ji}(t) / p_{ji}(t) - G_{ji}(t);\ j = \overline{1,n};\ \ k = \overline{1,n};\ \ t \in [t_{i-1}; t_i],\ i = 1,2,\ldots, \end{aligned} \tag{11}$$

где в дополнение к (3) введены переменные (нестационарные) параметры $p_{ji}(t)$, которые меняются медленно по сравнению с возможным изменением координат состояния по крайней мере на протяженных интервалах времени.

Обозначим

$$\begin{aligned} &\ddot{Y}_{ji}(t) = \varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t); x_{ki}(t); \dot{x}_{ki}(t); \ddot{x}_{ki}(t); t\right) - \varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t); y_{зад.ki}(t); \dot{y}_{зад.ki}(t); \ddot{y}_{зад.ki}(t); t\right) + \\ &+ U_{ji}(t) / p_{ji}(t);\ \ j = \overline{1,n};\ k = \overline{1,n};\ t \in [t_{i-1}; t_i],\ \ i = 1,2,\ldots \end{aligned} \tag{12}$$

и, предполагая, как и в разделе 1, численную определенность $\ddot{Y}_{ji}(t)$, считаем, что для рассматриваемых процессов (11), по крайней мере, в ограниченных областях управляемости существует и единственно решение системы уравнений (12) относительно $U_{ji}(t)$, $j=\overline{1,n}$, $t \in [t_{i-1}; t_i]$, $i=1,2,\ldots.$

Теперь система (12) принимает вид

$$\ddot{z}_{ji}(t) = \ddot{Y}_{ji}(t) - G_{ji}(t); j = \overline{1,n};\ k = \overline{1,n};\ t \in [t_{i-1}; t_i]$$

и по уравнениям $j=\overline{1,n}$ совпадает с формой представления исходного дифференциального уравнения дельта-преобразований второго порядка.

Вводим запись уравнений (12) для (i+1)-го шага и определяем:

$$\left.\begin{aligned} &U_{j,i+1}(t) = \Big(\ddot{Y}_{j,i+1} - \varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t); x_{ki}(t); \dot{x}_{ki}(t); \ddot{x}_{ki}(t); t\right) + \\ &+ \varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t); y_{зад.ki}(t); \dot{y}_{зад.ki}(t); \ddot{y}_{зад.ki}(t); t\right)\Big) p_{j,i+1}(t); \\ &t \in [t_i, t_{i+1}];\ \ j = \overline{1,n};\ \ \ \ k = \overline{1,n} \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

Предположим, что в (13) известно ограничение

$$\begin{aligned} &\left|\varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t); x_{ki}(t); \dot{x}_{ki}(t); \ddot{x}_{ki}(t); t\right) - \varphi_j\left(\overline{P}_{ji}(t); y_{зад.ki}(t); \dot{y}_{зад.ki}(t); \ddot{y}_{зад.ki}(t); t\right)\right| \le B_j; \\ &t \in [t_i, t_{i+1}];\ \ j = \overline{1,n};\ \ \ \ k = \overline{1,n}. \end{aligned} \tag{14}$$

Выбираем значение c_j^*, приближенно соответствующее требуемой точности управления в установившемся процессе ($c_j^* \approx> \mu_j$, μ_j - требуемый уровень ошибки управления при отсутствии или слабом проявлении внешних возмущающих воздействий). Далее учитывая, что

$$\ddot{Y}_j = c_j^* / \nabla t^2,$$

выбираем такое значение шага дискретизации ∇t, чтобы выполнялось соотношение:

$$\left|\ddot{Y}_j\right| >\approx 4B_j. \quad (15)$$

Последнее выражение базируется на условии обеспечения оптимизированных соотношений между модулем кванта модуляции и наихудшими возмущающими воздействиями [1].

Учитывая изложенное выше, в выражении (13) для управляющего воздействия можно ослабить требования к точности представления правой части и даже пренебречь ее функциональной составляющей. Остановимся на предельном случае упрощения, и теперь (13) можем представить в виде

$$U_{j,i+1} = \ddot{Y}_{j,i+1} p_{j,i+1}(t); \quad j = \overline{1,n}; \quad k = \overline{1,n}. \quad (16)$$

Неучтенная в (16) составляющая уравнений движения перешла в приведенные (неизмеряемые) внешние возмущающие воздействия $G_j(t)$ (11). Таким образом, на основе изложенного выше представляются возможности синтеза алгоритмов управления при существенной структурной неопределенности с обеспечением достаточных качественных характеристик (характеристики соответствуют примерно (8)÷(10)). С более точными характеристиками при наихудших воздействиях можно ознакомиться в [1]. На практике для оценки значения B_j может быть необязательным знание описания функции $\varphi_j(\ldots)$. Кроме того, это значение может быть задано с значительной степенью огрубления (в сторону увеличения). При отсутствии априорной оценки значения B_j в случае существования этого ограничения можно организовать адаптивный режим автоматического определения c_j^* (по необходимости в сочетании с подбором ∇t) [1]. Обращаем внимание на то, что в правую часть выражений для управляющих воздействий (16) уже не входят координаты состояния, в связи с чем отпадает необходимость их уточненного формирования на основе экстраполяционных соотношений. Проблемы применения рассмотренной методики синтеза могут возникнуть при наличии ограничений на управляющие воздействия, если не удается обеспечить эти ограничения при удовлетворительных качественных характеристиках процессов управления.

Синтез алгоритмов цифрового управления для объектов с параметрической и частичной структурной неопределенностями. В качестве исходных уравнений движения будем рассматривать (11) при j=1. Далее индекс j опускаем из рассмотрения. Принимаем, также, в рамках данного рассмотрения $y_{зад.i}=0$; $i=0,1,2,\ldots$ (в более общем случае можно рассматривать переменное задающее воздействие $y_{зад.i}\neq 0$; $i=0,1,2,\ldots$).

Предположим далее, что в уравнениях движения (11) параметр $p_{i+1}\in[p^н\div p^в]$ ($p^н$ - значение нижнего уровня, $p^в$ - значение верхнего уровня) может быть из существенно большого диапазона числовых значений ($p^в >> p^н$) и применение предложенной в разделе 2 методики оказывается невозможным. В то же время на рассматриваемых интервалах управления это значение остается постоянным (данное утверждение может быть на самом деле не столь строгим). В связи с отмеченным выше обозначаем для дальнейшего $p=p(t)$.

Предполагаем, что для всех возможных значений параметров в (11) выполняются условия (14), (15) и тогда выражение (16) для управляющего воздействия запишем в виде

$$U_{i+1} = \ddot{Y}_{i+1} b_s, \quad i = 1,2,\dots,$$

где b_s - переменная, конечное значение которой должно быть идентифицировано достаточно близко действующему в (11) параметру p, s - номер интервала идентификации.

Ниже рассматривается простейший алгоритм одного варианта решения задачи идентификации и собственно управления (без фильтра). Вводим два этапа в организации процессов идентификации и адаптивного управления:

а) Идентификация. Принимаем

$$b_0 \le p^н, \quad y_{зад.идент.,i} = x_0, \; i = \overline{0, i}_{идент.}$$

б) Ошибка управления на каждом шаге

$$z_i = x_i - x_0, \; i = \overline{0, i}_{идент.}$$

Формирование $b_s \approx p$ осуществляется в процессе пошагового выполнения действий в соответствии с двоичным алгоритмом дельта-преобразований и следующим алгоритмом формирования значения b_s начальные значения i=0, d=1, s=1):

$$\left.\begin{aligned}
& i := i + 1; \\
& Z_{сум} = \sum_{\eta=d}^{i} \left| z_\eta \right|; \; \delta Z_{сум} = \sum_{\eta=d}^{i} \left| z_i - z_{i-1} \right|; \\
& если \;\; i - d + 1 = q, \; то \\
& Z_{ср}^{p} = \frac{Z_{сум}}{q}, \delta Z_{ср}^{p} = \frac{\delta Z_{сум}}{q}, \\
& F1_s = sign\left(\frac{Z_{ср}^{p}}{c_0^*} - H \right); F2_s = sign\left(\frac{\delta Z_{ср}^{p}}{c_0^*} - h \right); \\
& если \quad F1_s > 0 \quad или \quad F2_s < 0, \\
& то \qquad b_{s+1} = b_s (1 + Q1_s); s := s + 1; d := i + 1, \\
& иначе \;\; b_{s+1} = b_s; \; s := s, \quad i_{идент.} = i.
\end{aligned}\right\}$$

с) Адаптивное управление. Вводится

$$y_{зад.i} = 0; \quad i = i_{идент.} + 1, i_{идент.} + 2, i_{идент.} + 3, \dots.$$

Ошибка управления определяется в виде

$$z_i = x_i - y_{зад.i} = x_i.$$

Используется двоичный алгоритм дельта-преобразования и адаптации к неизмеряемым возмущающим воздействиям (c_0^* - начальное значение).

В процессе выполнения первого этапа формируется вынужденное движение в направлении, параллельном оси ординат. При малых значениях b_s по сравнению с p формируются управляющие воздействия, которые не обеспечивают перемещений объекта, соответствующих реакции объекта при параметре p, и осуществляется поинтервальное (q шагов) нарастание значения b_s на небольшую относительно единицы величину, определяемую $Q1_s$ ($Q1_s$ - переменная, а в частном случае постоянная величина). Нарастание b_s выполняется до тех пор, когда под действием собственных управляющих воздействий при знакопеременном характере знаков квантов двоичной модуляции объект начинает "двигаться по ухабам". В качестве признаков соответствия этого движения идентифицированному используется граничное условие H для оптимального соотношения в установившемся процессе между средней по модулю ошибкой управления и заложенным теоретическим значением c_0^*[1], а также граничное условие h для выявления достаточно больших соответствующих квантам модуляции в установившемся процессе (знакопеременным) приращениям ошибки.

На втором этапе вводится истинное задающее воздействие и реализуется адаптивный алгоритм управления.

Заключение. В данной работе рассмотрена новая методология синтеза алгоритмов цифрового автоматического управления, представляющая важные для практического использования широкие возможности эффективного проектирования систем с линейными и нелинейными стационарными и нестационарными объектами, при неконтролируемых возмущающих воздействиях, с параметрической и частичной структурной неопределенностями в описании объектов. Проведенные эксперименты с использованием программных моделей систем управления подтвердили справедливость приводимых в статье результатов.

Возможности оперативного изменения параметров квантов модуляции (c_i^* и ∇t) представляют основу для развития логических (интеллектуальных) методов формирования определенных качественных характеристик в процессе проектирования и собственно управления (ускорение процесса идентификации; приспособление процесса идентификации к специфике конкретных технических требований; управление помехоустойчивостью системы и формирование требований к цифровому фильтру; повышение скорости адаптации к неконтролируемым возмущениям; управление потребляемой энергией, решение вопросов ее минимизации, в частности, по каналу управляющего воздействия и т.п.).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кравченко П.П.* Основы теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка. Цифровое управление, сжатие и параллельная обработка информации. - Таганрог: изд-во ТРТУ, 1997. - 200 с.
2. *Кравченко П.П.* Высокопроизводительные алгоритмы дельта-модуляции, оптимизированной по быстродействию и точности // Электросвязь. - 1989. - Вып. 9. - С. 44-47.