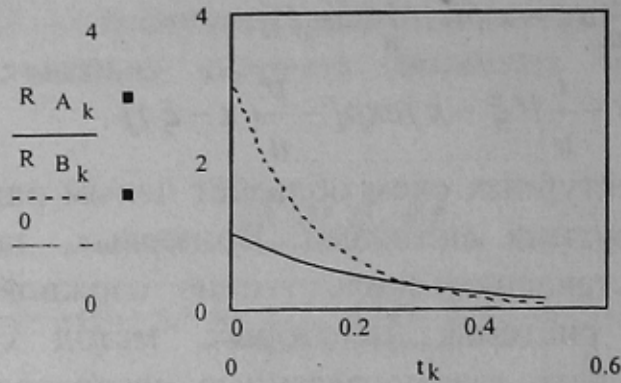


же абстрактные распределенные системы целесообразно применять при последующей реализации задачи идентификации их параметров.



Список источников

1. Бутковский А. Г. Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977.
2. Бутковский А. Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1979.

## СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ИЗ УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОРЯДКА АСТАТИЗМА

А.И. Андреев

Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова.

Эффективным путем повышения энергетических и качественных показателей радиотехнических и телекоммуникационных систем является совершенствование силовых электронных устройств (СЭУ), которые включают усилители, формирователи, стабилизаторы и преобразователи напряжения. По функциональному назначению эти устройства существенно отличаются друг от друга, однако, с энергетической точки зрения их можно рассматривать как устройства преобразования входной энергии в энергию, необходимую для нагрузки качества [1]. Улучшение энергетических показателей СЭУ связано с дискретными (импульсными и цифровыми) методами управления силовыми полупроводниковыми приборами и (или) с применением регулируемых (следающих) источников питания [2]. Среди

импульсных методов управления наибольшее распространение получили широтно-импульсная и частотно-импульсная модуляции, а среди цифровых методов управления – дельта-модуляция (ДМ) [3].

ДМ представляет собой разновидность цифровых разностных систем с предсказанием, где разностный сигнал – двухуровневый и информация передается лишь о знаке приращения [4]. В схеме классической (линейной) ДМ в качестве предсказателя используется одиночный интегратор. Одним из возможных способов совершенствования предсказателя является применение двойного интегратора, который состоит из каскадного соединения двух одиночных интеграторов. Его импульсная реакция представляет собой линейно-нарастающую функцию времени. При воздействии каждого из импульсов скорость нарастания отклика увеличивается на один шаг. В соответствии с этим формируемая двойным интегратором копия сигнала представляет собой не ступенчатую функцию, как при одинарном интеграторе, а состоит из отрезков, наклон которых соответствует импульсному сигналу на входе интегратора. Переход к двойному интегрированию в схеме ДМ увеличивает защищенность от шума квантования.

Повышение качественных (точностных) показателей СЭУ обусловлено степенью компенсации влияния возмущающих воздействий на управляющую величину, в достижении ее независимости от возмущений и обеспечении возможно точного воспроизведения задающего воздействия.

По алгоритму функционирования СЭУ подразделяются на следящие и стабилизирующие системы. По способу формирования управляющего воздействия различают следующие принципы управления СЭУ: по отклонению (замкнутые) и с комбинированным управлением, который сочетает принципы управления по отклонению и возмущению.

В статье рассматриваются задачи синтеза СЭУ с цифровым управлением (дельта-модуляцией с двойным интегратором в предсказателе) в классе систем по отклонению и комбинированных систем, работающих в режиме слежения, из условия повышения порядка астатизма.

Структурная схема замкнутой системы СЭУ с цифровым управлением представлена на рис.1, где  $\alpha(t)$  – задающее воздействие,  $\beta(t)$  – управляемая величина,  $\theta(t)$  – отклонение управляемой величины от требуемого значения,  $K_n(z)$  – дискретная передаточная функция порогового устройства с интеграторами И1, И2 в цепи местной отрицательной обратной связи,  $K_H(p) = K_{\phi\alpha}(p)K_{ИЗ}(p)K_{НЛЧ}(p)$  – передаточная функция приведенной непрерывной части, содержащей фиксирующий элемент нулевого порядка, интегратор И3 и непрерывную линейную часть первого порядка,  $\Sigma 1$  – элемент сравнения.

Передаточные функции звеньев следующие:

$$K_{\phi\alpha}(p) = \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p}, \quad K_{И1}(p) = \frac{k_{И1}}{p}, \quad K_{И2}(p) = \frac{k_{И2}}{p}, \quad K_{ИЗ}(p) = \frac{k_{ИЗ}}{p},$$

$$K_{НЛЧ}(p) = \frac{k_{\phi}}{T_{\phi}^2 p^2 + 2\xi T_{\phi} p + 1},$$

где  $T_0$  – период повторения импульсов;

$T_{\phi}$  – постоянная времени фильтра;

$k_{И1}, k_{И2}, k_{ИЗ}, k_{\phi}$  – коэффициенты усиления

соответствующих звеньев;

$p \equiv d/dt$  – символ дифференцирования.

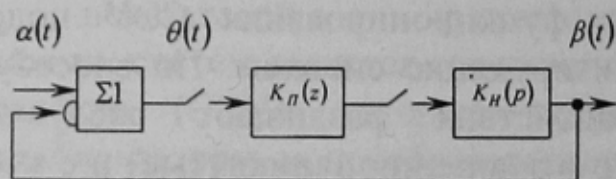


Рисунок 1 - Структурная схема замкнутой системы СЭУ

Передаточные функции звеньев следующие:

$$K_{\phi\alpha}(p) = \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p}, \quad K_{И1}(p) = \frac{k_{И1}}{p}, \quad K_{И2}(p) = \frac{k_{И2}}{p}, \quad K_{ИЗ}(p) = \frac{k_{ИЗ}}{p},$$



$$K_{НЛЧ}(p) = \frac{k_\phi}{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1},$$

где  $T_0$  – период повторения импульсов;

$T_\phi$  – постоянная времени фильтра;

$k_{И1}, k_{И2}, k_{И3}, k_\phi$  – коэффициенты усиления

соответствующих звеньев;

$p \equiv d/dt$  – символ дифференцирования.

Согласно рис.1 уравнение динамики для системы имеет вид:

$$\theta(p) = \alpha(p) - \beta(p)$$

$$\beta(p) = K_\Pi(z) K_H(p) \theta(p).$$

Применив дискретное преобразование Лапласа (z-преобразование) получим дискретную передаточную функцию системы по ошибке, вызываемой задающим воздействием:

$$K(z) = \frac{\theta(z)}{\alpha(z)} = \frac{1}{1 + K_\Pi(z) K_H(z)} = \frac{F_\Pi(z) F_H(z)}{F_\Pi(z) F_H(z) + D_\Pi(z) D_H(z)},$$

где  $K_i(z) = D_i(z)/F_i(z)$ .

Определим дискретные передаточные функции звеньев:

– порогового устройства

$$K_\Pi(z) = \frac{1}{1 + Z \left\{ \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p} \cdot \frac{k_{И1}}{p} \cdot \frac{k_{И2}}{p} \right\}} = \frac{2(1 - z^{-1})^2}{2 + az^{-1} - bz^{-1}},$$

где  $a = k_{И1} k_{И2} T_0^2 - 4$ ,  $b = k_{И1} k_{И2} T_0^2 + 2$ ;

– приведенной непрерывной части, которая согласно [5] может быть представлена в виде

$$K_n(z) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p} \cdot \frac{k_{u3}}{p} \cdot \frac{k_\phi}{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1} \right\} =$$

$$= \frac{c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3}} = \frac{c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3}}{(1 - z^{-1})[1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3 z^{-2}]},$$

где

$$c_1 = \frac{k_{u3} k_\phi}{a^2} \left[ aT_0 - b + b\sqrt{B} \left( \cos kT_0 + \frac{b^2 - 2a}{2bk} \sin kT_0 \right) \right],$$

$$c_2 = \frac{k_{u3} k_\phi}{a^2} \left[ b(1 - B) - 2aT_0 \sqrt{B} \cos kT_0 - 2b\sqrt{B} \frac{b^2 - 2a}{2bk} \sin kT_0 \right],$$

$$c_3 = \frac{k_{u3} k_\phi}{a^2} \left[ (aT_0 + b)B - b\sqrt{B} \left( \cos kT_0 - \frac{b^2 - 2a}{2bk} \sin kT_0 \right) \right],$$

$$d_1 = -(1 + 2\sqrt{B} \cos kT_0), \quad d_2 = B + 2\sqrt{B} \cos kT_0, \quad d_3 = -B,$$

$$B = e^{-bT_0}, \quad k = \sqrt{a - b^2/4}, \quad b = \frac{2\xi}{T_\phi}, \quad a = \frac{1}{T_\phi^2}.$$

После подстановки значений передаточных функций звеньев и преобразования получаем

$$K(z) = \frac{\theta(z)}{\alpha(z)} = (1 - z^{-1})^{\nu=0} \times$$

$$\times \frac{(2 + az^{-1} + bz^{-2})[1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3 z^{-2}]}{(2 + az^{-1} + bz^{-2})[1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3 z^{-2}] + 2(1 - z^{-1})(c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3})}$$

Порядок астатизма системы определяется степенью  $\nu$  оператора конечной разности  $(1 - z^{-1})$ , являющегося общим множителем дискретной передаточной функции по ошибке. Замкнутая система СЭУ с цифровым управлением имеет астатизм нулевого порядка, т.е. является статической и в ней возникает постоянная ошибка при ступенчатом изменении задающего воздействия и возрастающая во времени до бесконечности при изменении задающего воздействия по линейному  $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t$  и более сложным законам.

Повышение точности (порядка астатизма) СЭУ может быть достигнуто за счет применения принципа комбинированного управления, сочетающего принципы управления по отклонению и принципы управления по возмущению [6]. В комбинированных системах отсутствует противоречие между условием инвариантности и условием устойчивости.

Комбинированная система СЭУ (рис.2) характеризуется наличием связи по задающему воздействию. Дискретная передаточная функция этой связи на структурной схеме обозначена  $K_k(z)$ ,  $\Sigma 2$  – суммирующее устройство.

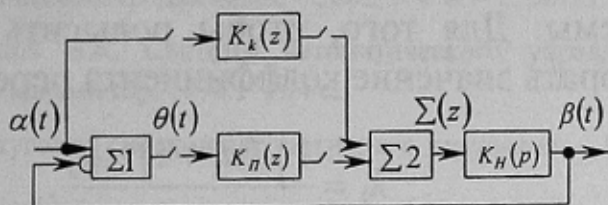


Рисунок 2 - Структурная схема комбинированной системы СЭУ

В соответствии с рис.2 уравнения элементов имеют вид:

$$\begin{aligned} \theta(p) &= \alpha(p) - \beta(p), \\ \Sigma(p) &= K_n(z)\theta(p) + K_k(z)\alpha(p), \\ \beta(p) &= K_H(p)\Sigma(z). \end{aligned}$$

Исключив промежуточные переменные  $\beta(p)$ ,  $\Sigma(z)$  находим дискретную передаточную функцию системы по ошибке, вызываемой задающим воздействием:

$$K(z) = \frac{1 - K_k(z)K_H(z)}{1 + K_n(z)K_H(z)} = \frac{[F_H(z) - K_k(z)D_H(z)]F_n(z)}{F_n(z)F_H(z) + D_n(z)D_H(z)}.$$

В соответствии с [7] выберем дискретную передаточную функцию связи вида

$$K_k(z) = k_1(1 - z^{-1}).$$



После подстановки значений передаточных функций звеньев и преобразования получаем

$$K(z) = (1 - z^{-1})^{v=0} \times \frac{\{[1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3z^{-2}] - k_1(c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + c_3z^{-3})\}(2 + az^{-1} + bz^{-2})}{(2 + az^{-1} + bz^{-2})[1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3z^{-2}] + 2(1 - z^{-1})(c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + c_3z^{-3})}$$

Как видно из полученного выражения передаточной функции комбинированной системы введения корректирующего звена связи по задающему воздействию еще не приводит к повышению порядка астатизма системы. Для того, чтобы повысить порядок астатизма необходимо выбрать значение коэффициента передачи

$$k_1 = \frac{1 + (d_1 + 1) - d_3}{c_1 + c_2 + c_3}.$$

Это выражение является условием повышения порядка астатизма с нулевого до первого и дискретная передаточная функция комбинированной системы примет вид:

$$K(z) = (1 - z^{-1})^{v=1} \times \frac{\{c_1(1 + d_3z^{-1}) + c_2\{1 + z^{-1}[1 + (d_1 + 1)]\} + c_3\{1 + z^{-1}[1 + (d_1 + 1)] + z^{-2}[1 + (d_1 + 1) - d_3]\}\}(2 + az^{-1} + bz^{-2})}{(c_1 + c_2 + c_3)\{[2 + az^{-1} + bz^{-2}][1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3z^{-2}] + 2(1 - z^{-1})(c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + c_3z^{-3})\}}$$

В такой следящей комбинированной системе СЭУ ошибки в установившихся режимах: при ступенчатом воздействии равна нулю; при воздействии, меняющемся по линейному закону равна постоянной величине и при воздействии, изменяющемся по закону квадратичной функции растет до бесконечности.

Дальнейшее повышение точности комбинированных следящих систем СЭУ с ДМ требует введения корректирующего звена связи по возмущению вида:

$$K_k(z) = k_1(1 - z^{-1}) + \sum_{i=1}^n k_i(1 - z^{-1})^i$$

Такое звено при конечном значении  $i$  может быть физически реализовано и, таким образом, условие инвариантности может быть достигнуто.

#### Список источников

1. Букреев С.С. Силовые электронные устройства. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.
2. Стеклов В.К., Андреев А.И. Системы автоматического керування регульованими джерелами живлення підсиловачів. – К.: Техніка, 2001. – 232 с.
3. Афонин М.В. Новое поколение ИБП // Сети и системы связи. – 1998. – №8(30). – с. 128-133.
4. Андреев А.И. Повышение точности силовых электронных устройств с цифровым управлением // Технічна електродинаміка. – 2002. – ч. 8. – с. 30-33.
5. Гостев В.И., Стеклов В.К. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами. – К.: Радиоаматор, 1998. – 704 с.
6. Стеклов В.К. Проектування системи автоматического керування. – К.: Вища шк., 1995. – 231 с.
7. Кунцевич В.М. Импульсные самонастраивающиеся и экстремальные системы автоматического регулирования. – К.: Техніка, 1966. – 282 с.

## ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ТЕМПЕРАТУРУ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ В АСУ ТП

Довгальок Б.П.

Дніпродзержинський державний технічний університет

Багаторічний аналіз ефективності використання автоматизованих систем прогнозування та керування процесами доменної плавки показує, що досягнути бажаних результатів по стабілізації якості чавуну не вдалося. Наші дослідження розкривають деякі особливості взаємозв'язку теплового стану процесу з температурою в печі. На їх основі розроблено новий спосіб та алгоритм використання інформації про температуру для прогнозування теплового стану доменної печі, що значно поліпшить точність прогнозу та керування.

Інформацією про тепловий стан доменної печі заводу “Кобе” (Японія, фірма “Kobe – Steel”) є периферійна температура в шахті, яка вимірюється за допомогою 28 термопарних датчиків, установлених у 380 точках. Статистичні дослідження виявили