



Передаточные функции звеньев:

$$K_{\Phi\Theta}(p) = \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p}; \quad K_{и1}(p) = \frac{k_{и1}}{p};$$

$$K_{и2}(p) = \frac{k_{и2}}{p}; \quad K_{и3}(p) = \frac{k_{и3}}{p};$$

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

где  $T_0$  – период повторения импульсов;  $T_{\Phi}$  – постоянная времени фильтра;  $k_{и1}, k_{и2}, k_{и3}, k_{\Phi}$  – коэффициенты передачи соответствующих звеньев;  $p \equiv \frac{d}{dt}$  – символ дифференцирования.

Согласно рис. 1 уравнения динамики для системы имеет вид:

$$\begin{cases} \Theta(p) = \alpha(p) - \beta(p); \\ \beta(p) = K_{\Pi}(z)K_{Н}(p)\Theta(p) - K_{L}(p)L(p). \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} K_{замк}(z) &= \frac{\Theta(z)}{L(z)} = \frac{K_{L}(z)}{1 + K_{\Pi}(z)K_{Н}(z)} = \\ &= \frac{D_{L}(z)F_{\Pi}(z)F_{Н}(z)}{[F_{\Pi}(z)F_{Н}(z) + D_{\Pi}(z)D_{Н}(z)]F_{L}(z)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $K_i(z) = \frac{D_i(z)}{F_i(z)}$ .

Определим дискретные передаточные функции звеньев методом разложения на элементарные дроби, коэффициенты которых находят либо по формулам вычетов либо методом неопределенных коэффициентов [4]:

- порогового устройства

$$\begin{aligned} K_{\Pi}(z) &= \frac{1}{1 + z \left\{ \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p} \cdot \frac{k_{и1}}{p} \cdot \frac{k_{и2}}{p} \right\}} = \\ &= \frac{2(1 - z^{-1})^2}{a - bz^{-1} + 2z^{-2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $a = 2 + k_{и1}k_{и2}T_0^2$ ;  $b = 4 - k_{и1}k_{и2}T_0^2$ ;

- приведенной непрерывной части

$$\begin{aligned} K_{Н}(z) &= Z \left\{ \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p} \cdot \frac{k_{и3}}{p} \cdot \frac{k_{\Phi}}{T_{\Phi}^2 p^2 + 2\xi T_{\Phi} p + 1} \right\} = \\ &= \frac{c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3}} \end{aligned}$$

$$= \frac{c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3}}{(1 - z^{-1})[1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3 z^{-2}]}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{k_{и3}k_{\Phi}}{a^2} [aT_0 - b + b\sqrt{B} \times \\ &\times (\cos kT_0 + \frac{b^2 - 2a}{2bk} \sin kT_0)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_2 &= \frac{k_{и3}k_{\Phi}}{a^2} [b(1 - B) - 2aT_0\sqrt{B} \cos kT_0 - \\ &- 2b\sqrt{B} \frac{b^2 - 2a}{2bk} \sin kT_0]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_3 &= \frac{k_{и3}k_{\Phi}}{a^2} [(aT_0 + b)B - b\sqrt{B} \times \\ &\times (\cos kT_0 - \frac{b^2 - 2a}{2bk} \sin kT_0)]; \end{aligned}$$

$$d_1 = -(1 + 2\sqrt{B} \cos kT_0);$$

$$d_2 = B + 2\sqrt{B} \cos kT_0;$$

$$d_3 = -B;$$

$$B = e^{-bT_0}; \quad k = \sqrt{a - \frac{b^2}{4}}; \quad b = \frac{2\xi}{T_{\Phi}}; \quad a = \frac{1}{T_{\Phi}^2};$$

- канала возмущения

$$\begin{aligned} K_{L}(z) &= Z \left\{ \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p} \cdot \frac{k_{\Phi}}{T_{\Phi}^2 p^2 + 2\xi T_{\Phi} p + 1} \right\} = \\ &= \frac{e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2}}{1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$e_1 = \frac{k_{\Phi}}{a} [1 - \sqrt{B} (\frac{b}{2k} \sin kT_0 + \cos kT_0)];$$

$$e_2 = \frac{k_{\Phi}}{a} [B + \sqrt{B} (\frac{b}{2k} \sin kT_0 - \cos kT_0)];$$

$$f_1 = -2\sqrt{B} \sin kT_0;$$

$$f_2 = B;$$

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

После подстановки значений передаточных функций звеньев (3)-(5) и преобразований получаем (2) в виде:

$$\begin{aligned} K_{ЗАМК}(z) &= (1 - z^{-1})^{v=0} \times \rightarrow \\ &\rightarrow \times \frac{(e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2})(a - bz^{-1} + 2z^{-2}) \times}{\left\{ (a - bz^{-1} + 2z^{-2})[1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3 z^{-2}] + \right.} \rightarrow \\ &\rightarrow \left. \frac{\times [1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3 z^{-2}]}{+ 2(1 - z_1)(c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3})} \right\} \times \rightarrow \end{aligned}$$

$$\rightarrow \frac{1}{\times(1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2})}. \quad (6)$$

Порядок астатизма системи определяется степенью  $v$  оператора конечной разности  $(1 - z^{-1})$ , являющего общим множителем числителя дискретной передаточной функции по ошибке. Стабилизирующая замкнутая система СПН с ЛДМ-2 и НЛЧ 2-го порядка имеет астатизм нулевого порядка, т.е. является статической и в ней возникает постоянная ошибка при ступенчатом изменении возмущающего воздействия и возрастающая во времени до бесконечности при изменении возмущающего воздействия по линейному  $L(t) = L_0 + L_1 t$  и более сложным законам.

Повышение точности (порядка астатизма) СПН с ЛДМ-2 может быть достигнуто за счет применения принципа комбинированного управления, в котором отсутствует противоречие между условием инвариантности и условием устойчивости.

Комбинированная система СПН с ЛДМ-2 и НЛЧ 2-го порядка (рис. 2) характеризуется наличием связи по возмущающему воздействию. Дискретная передаточная функция этой связи на структурной схеме обозначена  $K_K(z)$ ,  $\sum 2$  - сумматор.

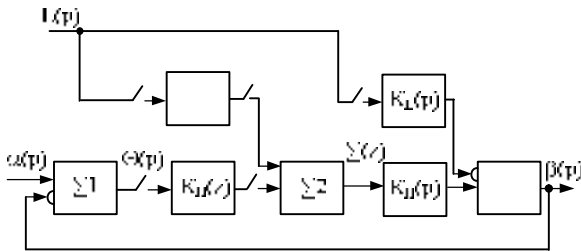


Рисунок 2 – Структурная схема стабилизирующей комбинированной системы СПН

В соответствии с рис. 2 уравнения элементов имеют вид:

$$\begin{cases} \Theta(p) = \alpha(p) - \beta(p); \\ \sum(z) = K_{\Pi}(z)\Theta(p) + K_K(z)L(p); \\ \beta(p) = K_H(p)\sum(z) - K_L(p)L(p). \end{cases} \quad (7)$$

Исключив промежуточные переменные находим дискретную передаточную функцию комбинированной системы по ошибке, вызываемой возмущающим воздействием:

$$K_{КОМБ}(z) = \frac{\Theta(z)}{L(z)} = \frac{K_L(z) - K_K(z)K_H(z)}{1 + K_{\Pi}(z)K_H(z)} = \frac{[D_L(z)F_H(z) - K_K(z)D_H(z)F_L(z)]F_{\Pi}(z)}{[F_{\Pi}(z)F_H(z) + D_{\Pi}(z)D_H(z)]F_L(z)}. \quad (8)$$

В соответствии с [5, 6] выберем дискретную функцию корректирующего звена вида:

$$K_K(z) = k_1(1 - z^{-1}). \quad (9)$$

После подстановки значений передаточных функций звеньев (3)-(5) получаем (8) в виде:

$$K_{КОМБ}(z) = (1 - z^{-1})^{v=0} \rightarrow$$

$$\begin{aligned} &\rightarrow \frac{\{(e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2}) \cdot [1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3 z^{-2}] - k_1 \times \\ &\quad \times \{a - b z^{-1} + 2z^{-2}\} [1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3 z^{-2}] + 2 \times \\ &\quad \times (c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3})(1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2})\} \times \\ &\quad \times (1 - z^{-1})(c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3})\} \times \\ &\rightarrow \frac{\times (a - b z^{-1} + 2z^{-2})}{\times (1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2})}. \end{aligned} \quad (10)$$

Как видно из выражения передаточной функции комбинированной системы (10) введение корректирующего звена по возмущающему воздействию еще не приводит к повышению порядка астатизма системы. Для того чтобы повысить порядок астатизма необходимо выбрать значение коэффициента передачи:

$$k_1 = \frac{(e_1 + e_2)[1 + (d_1 + 1) - d_3]}{(c_1 + c_2 + c_3)(1 + f_1 + f_2)}. \quad (11)$$

Выражение (11) является условием повышения порядка астатизма с нулевого до первого и дискретная передаточная функция комбинированной системы по ошибке примет вид:

$$\begin{aligned} K_{КОМБ}(z) &= \frac{\Theta(z)}{L(z)} = (1 - z^{-1})^{v=1} \times \rightarrow \\ &\rightarrow \times \frac{e_1 c_1 z^{-1} [f_1 + f_2 (1 + z^{-1})] + e_1 (d_1 + 1) c_1 z^{-1} \times \\ &\quad \times (c_1 + c_2 + c_3)(1 + f_1 + f_2) \{a - b z^{-1} + 2z^{-2}\} \times \\ &\quad \times [f_2 z^{-1} (1 + z^{-1}) - 1] + e_1 d_3 c_1 z^{-1} [(1 + z^{-1}) + \\ &\quad \times [1 + (d_1 + 1)z^{-1} - d_3 z^{-2}]] + \\ &\quad \times [f_1 z^{-1}] + e_1 c_2 z^{-1} [1 + f_1 (1 + z^{-1}) + f_2 (1 + z^{-1} + \\ &\quad + 2(1 - z^{-1})(c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3})] \times \\ &\quad \times [1 + z^{-2}] + e_1 (d_1 + 1) c_2 z^{-2} [f_1 + f_2 (1 + z^{-1})] + \\ &\quad \times (1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}) \\ &\quad \times [1 + z^{-1}] + \\ &\quad \times [f_1 (1 + z^{-1} + z^{-2}) + f_2 (1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3}) + \\ &\quad \times [1 + z^{-1}] + f_2 (1 + z^{-1} + z^{-2}) + \\ &\quad \times [1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3}) + \\ &\quad \times [1 + z^{-1}] + f_1 z^{-1}] + e_2 d_3 c_1 z^{-1} [(1 + z^{-1} + z^{-2}) + \\ &\quad \times [1 + z^{-1} + z^{-2}) + e_2 c_1 z^{-1} (f_1 z^{-1} - 1) + e_2 (d_1 + 1) c_1 z^{-1} \times \\ &\quad \times [1 + z^{-1}] + f_1 z^{-1}] + e_2 d_3 c_1 z^{-1} [(1 + z^{-1} + z^{-2}) + \\ &\quad \times [1 + z^{-1} + z^{-2}) + e_2 c_2 z^{-2} \times \\ &\quad \times [f_1 + f_2 z^{-1} (1 + z^{-1})] + e_2 (d_1 + 1) c_2 z^{-2} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\rightarrow \frac{\times (f_2 z^{-1} - 1) + e_2 d_3 c_2 z^{-3} (1 - f_2 z^{-1}) + e_2 c_3 z^{-2} \times}{\rightarrow} \rightarrow \\ &\frac{\times [1 + f_1 (1 + z^{-1}) + f_2 (1 + z^{-1} + z^{-2})] +}{\rightarrow} \rightarrow \\ &\frac{+ e_2 (d_1 + 1) c_3 z^{-2} [f_1 + f_2 (1 + z^{-1})] +}{\rightarrow} \rightarrow \\ &\frac{+ e_2 d_3 c_3 z^{-3} (1 - f_2 z^{-1})}{\rightarrow} \end{aligned} \quad (12)$$

В такой стабилизирующей комбинированной системе СПН с ЛДМ-2 и НЛЧ 2-го порядка ошибки в установившихся режимах: при ступенчатом воздействии равна нулю; при воздействии, изменяющемся по линейному закону равна постоянной величине; при воздействии, изменяющемся по закону квадратичной функции вырастает до бесконечности.

**Выводы.** Показано, что замкнутая система СПН с ЛДМ-2 и НЛЧ 2-го порядка является статической, т.е. имеет нулевой порядок астатизма. В ней возникает постоянная ошибка при ступенчатом изменении возмущающего воздействия и возрастающие во времени до бесконечности при изменении воздействия по более сложным законам.

Введение корректирующего звена в комбинированную систему СПН еще не приводит к увеличению порядка астатизма. Только при определенном значении коэффициента передачи корректирующего

звена порядок астатизма становится равным единице, т.е. устраняется ошибка при ступенчатом изменении возмущающего воздействия.

Дальнейшее повышение порядка астатизма (точности) СПН требует усложнения вида передаточной функции корректирующего звена.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Погрибной В.А. Дельта-модуляция в цифровой обработке сигналов. – М.: Радио и связь, 1990. – 216 с.
2. Венедиктов М.Д., Марков В.В., Эйдус Г.С. Дельта-модуляция. Развитие, состояние, перспектива (обзор) // Радиотехника. – 1975. – Т.30. – №9. – С. 1-11.
3. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Брицкий О.І. Теорія автоматичного управління. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
4. Гостев В.И., Стеклов В.К. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами. – К.: Радиоаматор, 1998. – 704 с.
5. Стеклов В.К., Андреев А.І. Системы автоматического керування регульованими джерелами живлення підсилювачів. – К.: Техніка, 2001. – 232 с.
6. Андреев А.И. Повышение статической точности транзисторных преобразователей напряжения класса Е //36. наук. праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАНУ. – 2007. – Вип. 42. – С. 20-25.

Стаття надійшла 9.05.2008 р.