УДК 621.39

О. В. ЗІНЧЕНКО,
Державний університет телекомунікацій, Київ

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРІВ ЗВ'ЯЗКУ ІТЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ *ФАП* ПРИ ЗАДАВАЛЬНОМУ ВПЛИВІ З НАКЛАДЕНОЮ ЗАВАДОЮ

Досліджено чинники підвищення динамічної точності ітераційної системи фазового автопідстроювання, що зазнає задавального впливу з накладеною завадою.

Ключові слова: ітераційна система ФАП; фазова помилка; синтез; завада; спектральна щільність; дисперсія фазової помилки.

Вступ

У багатьох практичних випадках на вхід ітераційної системи (ІС) фазового автопідстроювання (ФАП) надходить задавальний вплив із накладеною завадою. Тоді структурна схема комбінованої ІС ФАП набирає вигляду згідно з рис. 1, *а* (тут і далі ОКУ, ДКУ — відповідно основний і додатковий контур управління).

Фазова помилка цієї системи подається виразом

$$\Delta\varphi_{к}(t) = W_{\Delta\varphi к}(p)\alpha(t) + W_{3к}(p)n(t).$$

Енергетичний спектр (ЕС) помилки знаходимо за формулою

$$S_{\Delta\varphi к}(\omega) = |W_{\Delta\varphi к}(j\omega)|^2\, G_{\alpha}(\omega) + |W_{3к}(j\omega)|^2\, S_n(\omega), \tag{1}$$

де $G_{\alpha}(\omega)$ і $S_n(\omega)$ — енергетичний спектр відповідно задавального впливу і завади.

При цьому справджуються такі рівності:

$$W_{\Delta\varphi к}(j\omega) = W_{\Delta\varphi 1к}(j\omega)W_{\Delta\varphi 2к}(j\omega) = \frac{1 - W_{р1}(j\omega)W_{КУ1}(j\omega)}{1 + W_{р1}(j\omega)} \cdot \frac{1 - W_{р2}(j\omega)W_{КУ2}(j\omega)}{1 + W_{р2}(j\omega)}, \tag{2}$$

$$W_{3к}(j\omega) = W_{31к}(j\omega) + W_{32к}(j\omega) - W_{31к}(j\omega)W_{32к}(j\omega),$$

або

$$W_{3к}(j\omega) = W_{31к}(j\omega) + W_{32к}(j\omega)W_{\Delta\varphi 1к}(j\omega),$$

звідки

$$W_{3к}(j\omega) = W_{31к}(j\omega)\left[1 + \frac{W_{32к}(j\omega)}{W_{р1}(j\omega)}\right].$$

Основна частина

Розглянемо комбіновану ітераційну систему ФАП, оператори якої визначаються такими виразами

$$\left.\begin{aligned} &W_{р1}(p) = W_{р2}(p) = k_р(T_1 p + 1)/[(T_2 p + 1)p], \\ &W_{КУ1}(p) = \frac{D_{КУ1}(p)}{F_{КУ1}(p)} = \frac{\tau p}{d_1 p + d_0} = \frac{\tau_1 p}{d_1 p + 1}, \\ &W_{КУ2}(p) = 0, \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

де τ_1 — перша похідна задавального впливу.

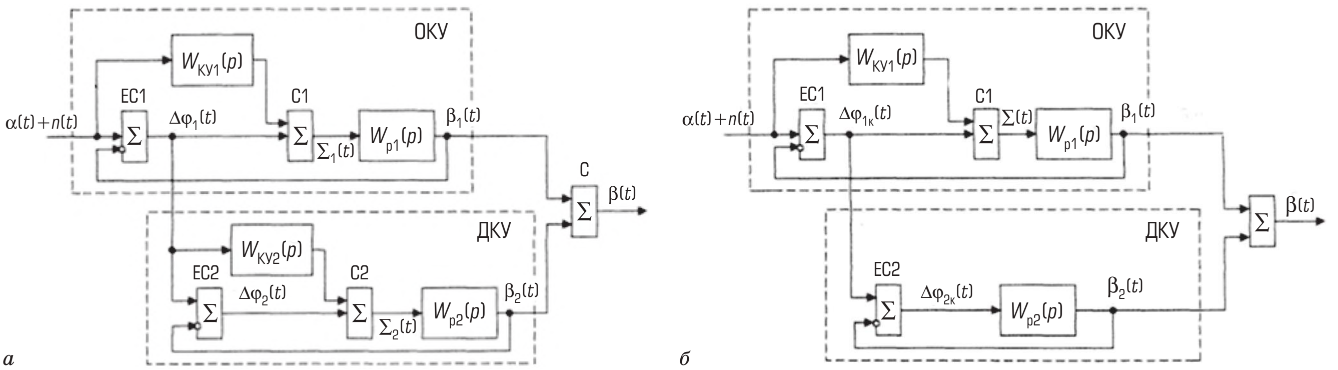

Рис. 1. Структурна схема комбінованої ІС ФАП: *а* — із двома розімкненими каналами управління; *б* — з одним розімкненим каналом управління

Нехай на вхід системи ФАП (рис. 1, *б*) надходить задавальний вплив, спектральна щільність у похідній якого підпорядковується розподілу Пуассона і визначається виразом

$$S_{\alpha}(\omega) = 2\mu a^2/(\omega^2 + \mu^2), \tag{4}$$

де a^2 — середнє значення квадрата швидкості зміни $\alpha(t)$, тобто середнє значення квадрата частоти; $1/\mu$ — середня довжина проміжків часу, протягом яких швидкість залишається постійною.

Якщо задавальним впливом вважати $\alpha'(t)$, а не $\alpha(t)$, або в зображеннях за Лапласом $s\alpha(s)$, а не $\alpha(s)$, то аби дістати передатну функцію комбінованої ітераційної системи, потрібно вихідний вираз поділити на s:

$$W_{\Delta\varphi_\text{к}}(s)/s = \Delta\varphi_\text{к}(s)/[s\alpha(s)]. \qquad (5)$$

Як заваду, накладену на корисний сигнал, візьмемо білий шум, енергетичний спектр (спектральна щільність) якого

$$S_n(\omega) = N_0 = \text{const}. \qquad (6)$$

З урахуванням виразів (2), (3), (4) і (5) маємо:

$$S_{\Delta\varphi_\text{к}}(\omega)=\left|\frac{F_\text{р}(j\omega)F_\text{КУ1}(j\omega)-D_\text{р}(j\omega)D_\text{КУ1}(j\omega)}{\left[D_\text{р}(j\omega)+F_\text{р}(j\omega)\right]F_\text{КУ1}(j\omega)}\cdot\frac{F_\text{р}(j\omega)}{\left[D_\text{р}(j\omega)+F_\text{р}(j\omega)\right]j\omega}\right|^2\frac{2\mu a^2}{\omega^2+\mu^2}+$$
$$+\left|\frac{D_\text{р}(j\omega)F_\text{КУ1}(j\omega)+D_\text{КУ1}(j\omega)F_\text{р}(j\omega)}{\left[D_\text{р}(j\omega)+F_\text{р}(j\omega)\right]F_\text{КУ1}(j\omega)}+\frac{D_\text{р}(j\omega)F_\text{р}(j\omega)}{\left[D_\text{р}(j\omega)+F_\text{р}(j\omega)\right]^2}\right|^2 N_0, \qquad (7)$$

тобто середнє значення квадрата помилки можна подати як суму двох складових:

$$\Delta\overline{\varphi}_\text{к}^2=\Delta\overline{\varphi}_{1\alpha}^2+\Delta\overline{\varphi}_{1n}^2.$$

При цьому справджуються такі рівності:

$$\Delta\overline{\varphi}_\text{к}^2=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}S_{\Delta\varphi_\text{к}}(\omega)d\omega,$$

$$\Delta\overline{\varphi}_{1\alpha}^2=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\frac{F_\text{р}(j\omega)F_\text{КУ1}(j\omega)-D_\text{р}(j\omega)D_\text{КУ1}(j\omega)}{\left[D_\text{р}(j\omega)+F_\text{р}(j\omega)\right]F_\text{КУ1}(j\omega)}\cdot\frac{F_\text{р}(j\omega)}{\left[D_\text{р}(j\omega)+F_\text{р}(j\omega)\right]j\omega}\right|^2\frac{2\mu a^2}{\omega^2+\mu^2}d\omega,$$

$$\Delta\overline{\varphi}_{1n}^2=\frac{N_0}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\frac{D_\text{р}(j\omega)F_\text{КУ1}(j\omega)+D_\text{КУ1}(j\omega)F_\text{р}(j\omega)}{\left[D_\text{р}(j\omega)+F_\text{р}(j\omega)\right]F_\text{КУ1}(j\omega)}+\frac{D_\text{р}(j\omega)F_\text{р}(j\omega)}{\left[D_\text{р}(j\omega)+F_\text{р}(j\omega)\right]^2}\right|^2 d\omega.$$

Підставивши в (7) конкретні значення $F_\text{р}(j\omega)$, $D_\text{р}(j\omega)$, $D_\text{КУ1}(j\omega)$, $F_\text{КУ1}(j\omega)$, дістанемо:

$$S_{\Delta\varphi_\text{к}}(\omega)=\left|\frac{(T_2j\omega+1)(d_1j\omega+1)j\omega-k_\text{р}\tau_1 j\omega}{\left[k_\text{р}(T_1j\omega+1)+(T_2j\omega+1)j\omega\right](d_1j\omega+1)}\cdot\frac{T_2j\omega+1}{k_\text{р}(T_1j\omega+1)+(T_2j\omega+1)j\omega}\right|^2\frac{2\mu a^2}{\omega^2+\mu^2}+$$
$$+\left|\frac{k_\text{р}(T_1j\omega+1)+(T_2j\omega+1)\tau_1(j\omega)}{\left[k_\text{р}(T_1j\omega+1)+(T_2j\omega+1)j\omega\right](d_1j\omega+1)}+\frac{k_\text{р}(T_2j\omega+1)}{\left[k_\text{р}(T_1j\omega+1)+(T_2j\omega+1)j\omega\right]^2}\right|^2 N_0=$$
$$=\left|\frac{(T_2j\omega+1)^2(d_1j\omega+1)j\omega-k_\text{р}\tau_1 j\omega(T_2j\omega+1)}{\left[k_\text{р}(T_1j\omega+1)+(T_2j\omega+1)j\omega\right]^2(d_1j\omega+1)}\right|^2\frac{2\mu a^2}{\omega^2+\mu^2}+$$
$$+\left|\frac{k_\text{р}(d_1j\omega+1)+(T_2j\omega+1)\tau_1(j\omega)}{\left[k_\text{р}(T_1j\omega+1)+(T_2j\omega+1)j\omega\right](d_1j\omega+1)}+\frac{k_\text{р}(T_2j\omega+1)}{\left[k_\text{р}(T_1j\omega+1)+(T_2j\omega+1)j\omega\right]^2}\right|^2 N_0.$$

Розглянемо наведені на рис. 2, *а*, *б* криві зміни дисперсії в ОКУ при

$$W_{\text{р}1}(s)=\frac{k_\text{р}(T_1s+1)}{(T_2s+1)s}=\frac{b_1s+b_0}{a_2s^2+a_1s}=\frac{D_{\text{р}1}(s)}{F_{\text{р}1}(s)},$$

де $k_\text{р}=5\text{с}^{-1}$; $T_1=0{,}01$ с; $T_2=0{,}025$ с; $b_1=k_\text{р}T_1$; $b_0=k_\text{р}$; $a_2=T_2$; $a_1=1$.

На вхід подається задавальний вплив, спектральна щільність якого визначається виразом (4), де $a=18^{\circ 2}/\text{с}^2$; $\mu=0{,}1$ с.

На задавальний вплив накладається завада, спектральна щільність якої $S_n(\omega)=0{,}01=N_0$.

Дисперсія помилки ОКУ з управлінням за відхиленням

$$\overline{\Delta\varphi^2}=\Delta\overline{\varphi}_\alpha^2+\Delta\overline{\varphi}_n^2,$$

де

$$\Delta\overline{\varphi}_\alpha^2=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\frac{(a_1j\omega+a_0)\sqrt{2\mu a}}{\left[c_2(j\omega)^2+c_1(j\omega)+c_0\right](j\omega+\mu)}\right|^2 d\omega=I_3=\frac{-c_2\cdot 2\mu a^2-c_2(c_1+c_2\mu)\cdot\mu a^2a_1^2/(\mu c_0)}{-2c_2\left[\mu c_0c_2+(c_1+c_2\mu)(c_0+\mu c_1)\right]};$$

$$\overline{\Delta\varphi_n^2} = I_2 = \frac{N_0\left(b_1^2 + b_0^2 c_2\right)/c_0}{2c_1c_2};$$

$$c_2 = a_2;\ c_1 = k_\text{р}T_1 + 1;\ c_0 = k_\text{р}.$$

Для комбінованого ОКУ при $W_\text{КУ1}(s) = \tau_1 s/(d_1 s + 1)$, де $d_1 = T_1$, маємо

$$\overline{\Delta\varphi_\text{к}^2} = \frac{-2c_2q^2\mu - 2c_2(c_1+c_2)\mu a^2\left(a_1-\tau_1\right)/(\mu c_0)}{-2c_2\left[\mu c_0c_2 - (c_1+c_2\mu)(c_0-\mu c_1)\right]} + \frac{N_0\left[\left(b_1+\tau_1\right)^2 + b_0^2c_2/c_0\right]}{2c_1c_2} = \overline{\Delta\varphi_\alpha^2} + \overline{\Delta\varphi_n^2}.$$

Тут і далі $q = \overline{\Delta\varphi_\alpha^2}/\overline{\Delta\varphi_n^2}$.

Візьмемо частинну похідну $\overline{\partial\Delta\varphi_\text{к}^2}/\partial\tau_1$ та прирівняємо її до нуля:

$$\overline{\partial\Delta\varphi_\text{к}^2}/\partial\tau_1 = 0. \tag{8}$$

Звідси знаходимо значення τ_1, яке відповідає мінімуму дисперсії ОКУ. При заданих значеннях параметрів ОКУ $\tau_1 = 0{,}8$ с.

Середньоквадратична помилка ОКУ без зв'язку за задавальним впливом $[W_\text{КУ1}(p) = 0]$ така:

$$\Delta\varphi_\text{с.к} = \sqrt{\overline{\Delta\varphi_\alpha^2} + \overline{\Delta\varphi_n^2}} = \sqrt{0{,}64 + 0{,}026} \approx 0{,}82. \tag{9}$$

У комбінованому ОКУ при $\tau_1 = 0{,}8$ с маємо

$$\Delta\varphi_\text{с.к.к} = \sqrt{0{,}035 + 0{,}144} \approx 0{,}42. \tag{10}$$

Порівнюючи вирази (9) і (10), бачимо, що при заданих параметрах ОКУ і вхідних впливах середньоквадратичне значення фазової помилки в комбінованій ОКУ в $\dfrac{\Delta\varphi_\text{с.к}}{\Delta\varphi_\text{с.к.к}} = 0{,}82/0{,}42 \approx 2$ рази менше, ніж в ОКУ з управлінням за відхиленням.

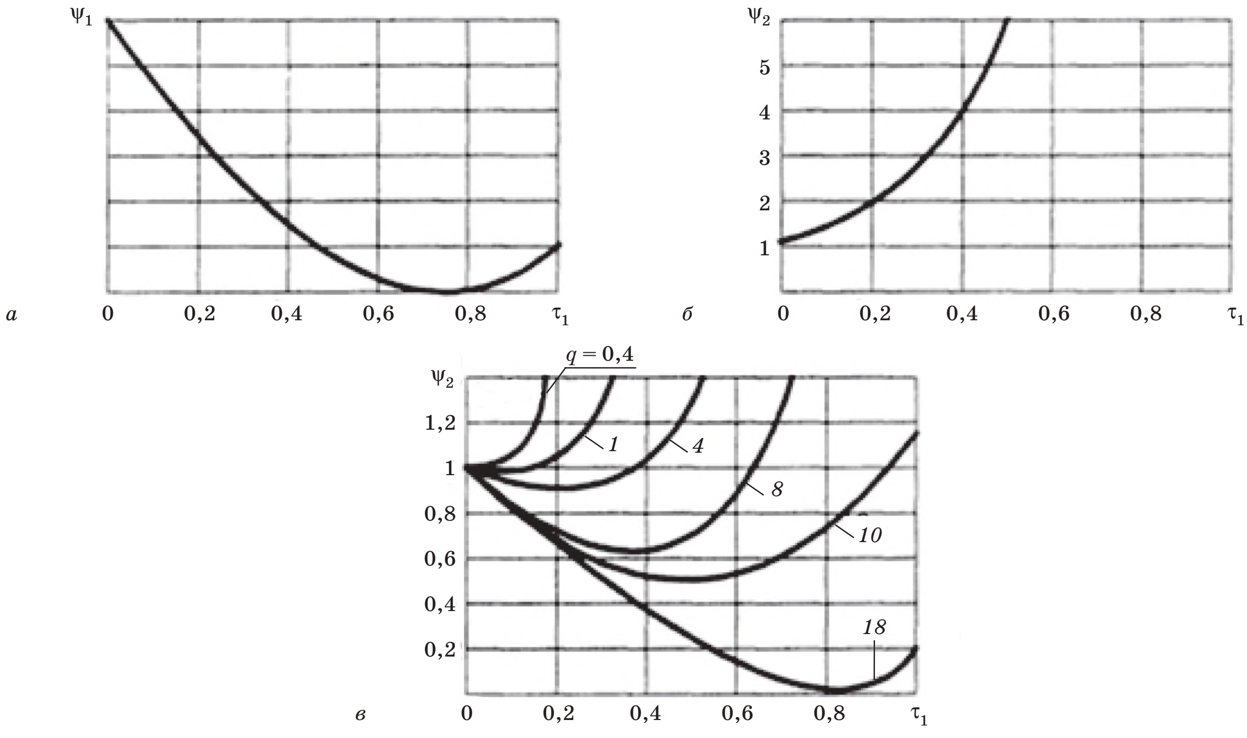

Рис. 2. Графіки залежності складових дисперсії фазової помилки (*а*, *б*) і сумарної дисперсії (*в*) від параметра τ_1 — швидкості зміни задавального впливу

Значення дисперсії фазової помилки в комбінованій ОКУ залежить від характеру зміни кривих $\psi_1 = \dfrac{\overline{\Delta\varphi_{\alpha_\text{к}}^2}}{\overline{\Delta\varphi_\alpha^2}} = f_1(\tau_1)$ і $\psi_2 = \dfrac{\overline{\Delta\varphi_{n_\text{к}}^2}}{\overline{\Delta\varphi_n^2}} = f_2(\tau)$ (див. рис. 2, *а*, *б*).

Для розглядуваного ОКУ маємо: зі зміною параметра τ_1 зв'язку за задавальним впливом дисперсія $\overline{\Delta\varphi_{\alpha_\text{к}}^2}$ в певних межах зміни τ_1 зменшується, а дисперсія $\overline{\Delta\varphi_{n_\text{к}}^2}$ зростає.

Відношення

$$\frac{\overline{\Delta\varphi_\text{к}^2}}{\overline{\Delta\varphi^2}} = \frac{\overline{\Delta\varphi_{\alpha_\text{к}}^2} + \overline{\Delta\varphi_{n_\text{к}}^2}}{\overline{\Delta\varphi_\alpha^2} + \overline{\Delta\varphi_n^2}} = f(\tau_1)$$

при певному значенні τ_1 має мінімум, залежний від рівня завади, яка при постійному значенні $\overline{\Delta\varphi_\alpha^2}$ визначається відношенням $q = \overline{\Delta\varphi_\alpha^2} / \overline{\Delta\varphi_n^2}$.

Криві $\psi_3 = \dfrac{\overline{\Delta\varphi_к^2}}{\overline{\Delta\varphi^2}} = f_3(\tau_1)$ при $q = \mathrm{const}$, зображені на рис. 2, *в*, ілюструють той факт, що значення мінімуму дисперсії фазової помилки зменшується зі збільшенням рівня завад.

Висновок

Ефективність застосування розімкнених компенсаційних каналів в ітераційних системах ФАП, що працюють при статистично заданому корисному (задавальному) діянні з накладеною завадою, знижується з підвищенням рівня завад.

Література

*1. **Коробко, В. В.** Цифровые двухконтурные системы фазовой автоподстройки / В. В. Коробко, В. К. Стеклов // Сб. науч. тр. КВИУС.— 2000.— С. 131–136.*

*2. **Стеклов, В. К.** Комбинированные системы фазовой автоподстройки / В. К. Стеклов.— К.: Техніка, 2004.— 327 с.*

О. В. Зинченко

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ СВЯЗИ ИТЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ *ФАП* ПРИ ЗАДАЮЩЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ С НАЛОЖЕННОЙ ПОМЕХОЙ

Исследованы факторы повышения динамической точности итерационной системы фазовой автоподстройки, подвергаемой задающему воздействию с наложенной помехой.

Ключевые слова: итерационная система ФАП; фазовая ошибка; синтез; помеха; спектральная плотность; дисперсия фазовой ошибки.

O. V. Zinchenko

SYNTHESIS OF COMMUNICATION PARAMETERS OF ITERATIVE SYSTEM OF A PLL WITH EXPOSURE TO SUPERIMPOSED

In the article were developed factors of dynamic accuracy rising of iterative system of phase self-tuning, which exposed to master control with superimposed interference .

Keywords: iterative system of a PLL; phase error; synthesis; interference; spectral density; dispersion of the phase error.