

УДК 621.3.072.6

О.М. Чекунова, С.А. Макаров, С.М. Рот

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ З НЕЛІНІЙНИМИ ЗАКОНАМИ АДАПТАЦІЇ

*У роботі вперше запропонована методика визначення основних властивостей адаптивних систем фазового автопідстроювання з динамічним регулюванням параметрів додаткового зворотного зв'язку за фазою по нелінійним законам адаптації: фільтруючих, динамічних, статистичних, шумових характеристик.*

*адаптивна система фазового автопідстроювання, нелінійні закони адаптації, методика визначення основних властивостей*

### Вступ

#### Постановка проблеми та аналіз публікацій.

Системи фазового автопідстроювання (ФАП) використовуються у різноманітних радіотехнічних пристроях, які являються основою систем управління і зв'язку. В сучасних умовах такі системи повинні мати невеликий час входження у радіозв'язок і малий час перебудови з однієї частоти на іншу. Це можливо досягти, як проаналізовано у [1, 2], введенням додаткових каналів по фазі, завдяки чому отримуємо адаптивну систему. Але недостатньо дослідженими залишаються адаптивні системи ФАП з нелінійними законами адаптації [4].

В [3] запропоновано методику синтезу самонастроювальних систем ФАП з лінійними законами адаптації, однак через недослідженість нелінійних інтерес представляє методика визначення основних властивостей адаптивних систем ФАП з нелінійними законами адаптації.

**Мета статті:** розробка методики визначення основних властивостей адаптивних систем ФАП.

#### Виклад основного матеріалу

Для визначення основних властивостей адаптивних систем ФАП необхідно дослідити фільтруючі, динамічні, статистичні, шумові характеристики системи ФАП.

При дослідженні фільтруючих здібностей інтерес представляють передаточні функції системи ФАП по відношенню до внутрішніх і зовнішніх завад, а також для фазової помилки стеження. Вказані передаточні функції дозволять проаналізувати амплітудно-частотну і фазочастотну характеристики системи ФАП, оцінити фільтруючі здібності удосконаленої системи по відношенню до внутрішніх і зовнішніх завад, оцінити еквівалентну завадову смугу системи і дисперсію фазової помилки стеження, а також час входження у синхронізм системи ФАП і її

смугу захоплення. При дослідженні статистичних характеристик удосконаленої системи ФАП необхідно вирішити дві задачі: дослідити здатність системи ФАП, яка увійшла у перехідний режим, потрапити в стійкий вузол при впливі на фазу вхідного сигналу завади, яка є зовнішньою по відношенню до системи ФАП, що розглядається; дослідити стійкість системи ФАП, яка знаходиться у вузлі, продовжує знаходитись в ньому при наявності зовнішньої завади.

Оцінка шумових характеристик синтезатору частот, побудованого на основі розробленої системи ФАП (рис. 1), проводиться в порівнянні з шумовими характеристиками базового синтезатору частот військового призначення, основою якого є звичайна однокільцева система ФАП.

**Аналіз фільтруючих здібностей по відношенню до зовнішніх і внутрішніх завад.** Завади у вхідному сигналі (сигналі синтезатора дрібної сітки) можуть виникати, наприклад, при наявності комбінаційних складових у спектрі вхідного сигналу і проявляються у флуктуаціях його фази і амплітуди. Ці завади є зовнішніми по відношенню до системи ФАП.

З другого боку, ГКН завжди володіє визначеною (нестабільністю амплітуди звичайно можливо знехтувати), що є результатом коливань живлячих напруг і температури навколишнього середовища, різних наводок на ланцюг управління чи на елементи генератора, а також результатом впливу можливих вібрацій, пов'язаних з умовами роботи схеми. Такі флуктуації своєї частоти ГКН розглядаються як результат впливу внутрішніх завад.

При функціонуванні системи ФАП необхідно оптимально використовувати низький рівень шумів коливань опорної частоти і коливання ГКН. У цьому випадку необхідно вибрати параметри системи ФАП так, щоб забезпечити задану смугу пропускання. Внаслідок чого виникає завдання з'ясувати, як

впливає введення в тракт ФАП додаткового зворотного зв'язку за фазою по нелінійним законам адап-

тації на фільтрацію одночасно діючих як зовнішніх, так і внутрішніх завад.

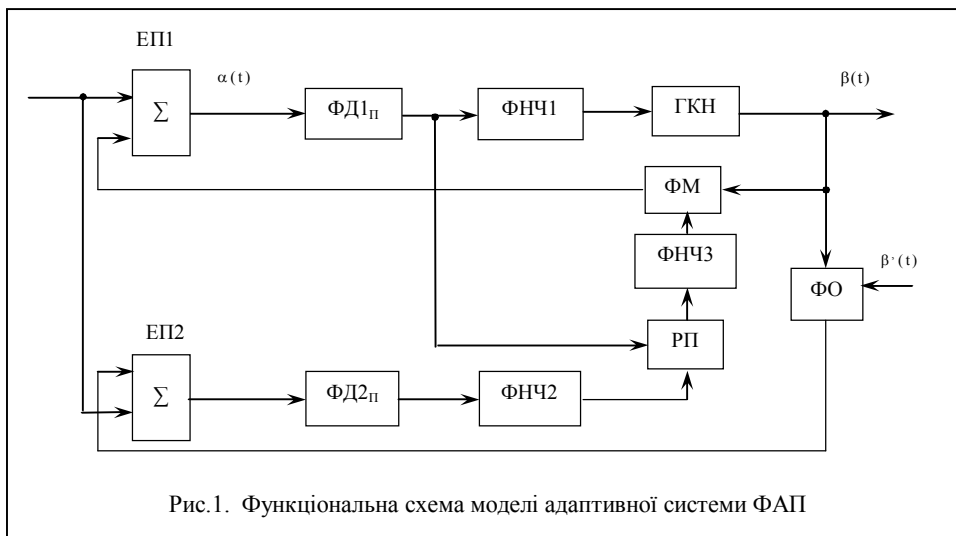


Рис.1. Функціональна схема моделі адаптивної системи ФАП

Дослідження частотних характеристик проведемо при припущенні того, що проява завад у вхідному сигналі і сигналі ГКН системи ФАП приводить до випадкових змін початкової фази цих сигналів. Таке припущення відповідає реальним умовам роботи системи ФАП.

При визначенні передаточних функцій системи ФАП відносно варіації фази вхідного сигналу і сигналу ГКН, використаємо лінійну модель системи, наведену в літературі [5], з'єднані послідовно блоки системи ФАП, що знаходяться між вузлами, об'єднаємо у вигляді окремих ланцюгів зі своїми передаточними функціями і проведемо структурне перетворення, яке представимо на рис. 2.

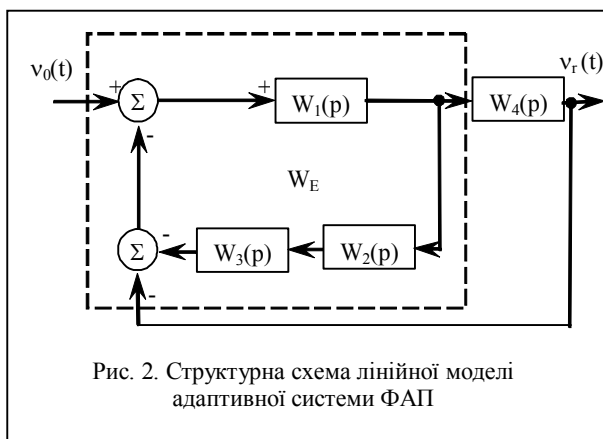


Рис. 2. Структурна схема лінійної моделі адаптивної системи ФАП

Передаточні функції системи ФАП з нелінійними законами регулювання коефіцієнта підсилення регульованого підсилювача можливо представити у наступному вигляді:

$$W_{01,02}(p) = \frac{W_E(p)W_4(p)}{1 + W_E(p)W_4(p)}, \quad (1)$$

де  $W_{01,02}(p)$  – передаточні функції системи ФАП відносно варіації фази вхідного сигналу відповідно

для  $\arctg(x)$  та  $\sqrt{x}$ ;  $W_E(p)$  – передаточна функція деякої еквівалентної ланки, що замінює собою лінеаризований ФДДЗЗ;  $W_4(p) = K_1(p)C_1 \cdot \frac{S_\Gamma}{p}$ , де  $C_1$  – коефіцієнт перетворення частоти ГКН,  $K_1(p) = \frac{1 + mp \cdot T_1}{1 + pT_1}$  – передаточна функція ФНЧ1,  $S_\Gamma$  – крутизна нелінійної функції характеристики управління ГКН  $\Phi_\Gamma\{\cdot\}$ ;

$$W_E(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)W_3(p)}, \quad (2)$$

у якій  $W_1(p) = E_1\kappa_1$ ;  $W_3(p) = K_3(p)S_m$ ;  $W_2(p) = K_0(1 - E_2\arctg(\kappa_2K_2(p)))$  – для  $\arctg$ -го закону адаптації;  $W_2(p) = K_0(1 - E_2\sqrt{\kappa_2K_2(p)})$  – для  $\sqrt{x}$ , де  $K_3(p) = \frac{1}{1 + pT_3}$  – передаточна функція

РП,  $K_2(p) = \frac{1}{1 + pT_2}$  – передаточна функція ФНЧ2;

$E_1, E_2$  – максимальна напруга, яку видає ФД1 та ФД2;  $F_1(a(p)) = \kappa_1, F_2(a(p) - \beta'(p)) = \kappa_2$  – нормована характеристика ФД1 та ФД2;  $a(p)$  – різниця фаз сигналів на виході ФД1;  $\beta'(p)$  – фазовий зсув сигналу у ФО;  $K_0$  – коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача;  $S_m$  – крутизна модуляційної характеристики ФМ;

$$W_{\Gamma1,\Gamma2}(p) = \frac{1}{1 + W_E(p)W_4(p)}, \quad (3)$$

де  $W_{\Gamma1,\Gamma2}(p)$  – передаточні функції системи ФАП відносно варіації фази сигналу ГКН відповідно для  $\arctg(x)$  та  $\sqrt{x}$ .

Складуючи почленно (1) з (3), отримаємо:

$$W_{01,02}(p) + W_{\Gamma_1, \Gamma_2}(p) = 1. \quad (4)$$

З рівняння (4) можна зробити висновок про те, що в системі ФАП зменшення коефіцієнта передачі для зовнішніх завад  $W_{01,02}(p)$  обов'язково приво-

дить до зменшення коефіцієнта передачі для внутрішніх завад  $W_{\Gamma_1, \Gamma_2}(p)$ , незалежно от типів фільтрів, що застосовуються, і параметрів системи.

Підставляючи значення  $K_1(p)$ ,  $K_2(p)$  і  $K_3(p)$ , отримаємо наступні вирази:

– для arctg-го закону адаптації:

$$W_{01}(p) = \frac{1}{1 + \frac{p(1+pT_1)}{\kappa_1 E_1 C_1 \Omega (1+mpT_1)} + \frac{\psi K_0 p (1+pT_1) \left(1 - E_2 \arctg\left(\frac{\kappa_2}{1+pT_2}\right)\right)}{E_1 C_1 \Omega (1+pT_3)(1+mpT_1)}}; \quad (5)$$

$$W_{\Gamma_1}(p) = \frac{1}{1 + \frac{\kappa_1 E_1 C_1 \Omega (1+mpT_1)}{p(1+pT_1)} + \frac{E_1 C_1 \Omega (1+pT_3)(1+mpT_1)}{\psi K_0 p (1+pT_1) \left(1 - E_2 \arctg\left(\frac{\kappa_2}{1+pT_2}\right)\right)}}; \quad (6)$$

– для  $\sqrt{x}$ :

$$W_{02}(p) = \frac{1}{1 + \frac{p(1+pT_1)}{\kappa_1 E_1 C_1 \Omega (1+mpT_1)} + \frac{\psi K_0 p (1+pT_1) \left(1 - E_2 \sqrt{\frac{\kappa_2}{1+pT_2}}\right)}{E_1 C_1 \Omega (1+pT_3)(1+mpT_1)}}; \quad (7)$$

$$W_{\Gamma_2}(p) = \frac{1}{1 + \frac{\kappa_1 E_1 C_1 \Omega (1+mpT_1)}{p(1+pT_1)} + \frac{E_1 C_1 \Omega (1+pT_3)(1+mpT_1)}{\psi K_0 p (1+pT_1) \left(1 - E_2 \sqrt{\frac{\kappa_2}{1+pT_2}}\right)}}. \quad (8)$$

Знаючи  $W_{01,02}(p)$  і  $W_{\Gamma_1, \Gamma_2}(p)$ , отримаємо передаточні функції системи ФАП для фазової помил-

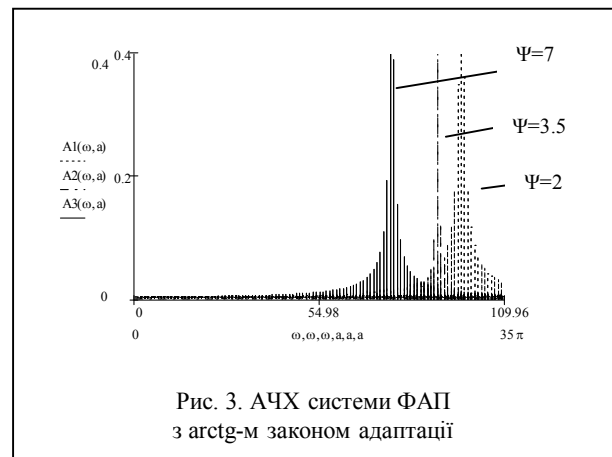
ки стеження і варіації фази вхідного сигналу для обох законів адаптації відповідно:

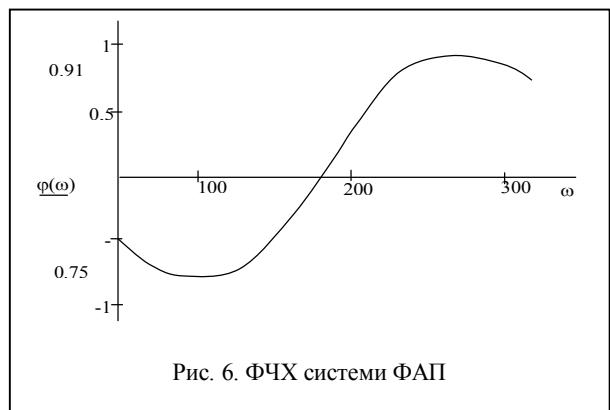
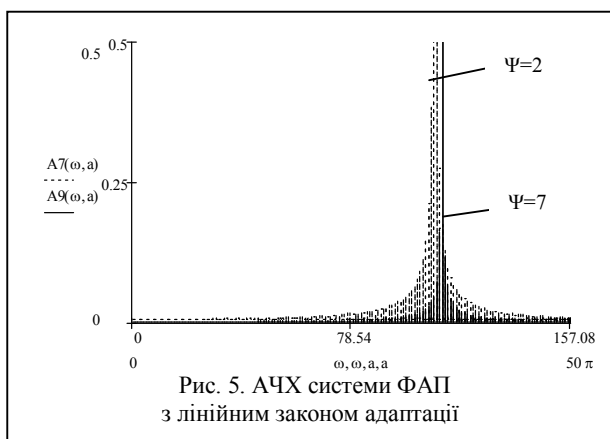
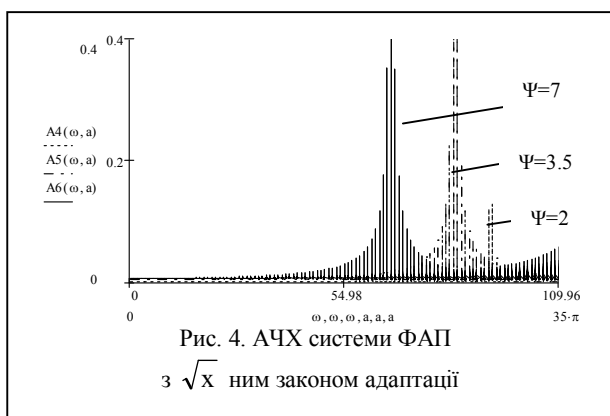
$$W_{a1}(p) = \frac{W_{01}(p)}{W_{\Gamma_1}(p)} = \frac{E_1^2 C_1^2 \Omega^2 a (1+mpT_1)^2 (1+pT_3)}{\psi K_0 p (1+pT_1)^2 \left(1 - E_2 \arctg\left(\frac{\kappa_2}{1+pT_2}\right)\right)}; \quad (9)$$

$$W_{a2}(p) = \frac{W_{02}(p)}{W_{\Gamma_2}(p)} = \frac{E_1^2 C_1^2 \Omega^2 a (1+mpT_1)^2 (1+pT_3)}{\psi K_0 p^2 (1+pT_1)^2 \left(1 - E_2 \sqrt{\frac{\kappa_2}{1+pT_2}}\right)}. \quad (10)$$

Використовуючи отримані вирази (5), (6), (9), (10) побудуємо амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) (рис. 3 – 5) з нелінійними законами адаптації і лінійним для порівняння при  $K_0=1$ ,  $m=0,3$ ,  $\psi=2; 3,5; 7$  відповідно і загальну фазочастотну характеристику (ФЧХ) (рис. 6) системи ФАП.

Так, для arctg(x) звуження смуги пропускання системи ФАП відбувається при  $\psi=3,5$ , тоді як для  $\sqrt{x}$  із зменшенням динамічного діапазону ФМ в ланцюгу зворотного зв'язку по фазі за допомогою варіювання параметру  $K_0$ .





Слід зауважити, що для лінійного закону адаптації відбувається все навпаки, тобто саме збільшення  $\psi$  призводить до звуження смуги пропускання системи ФАП, а, відповідно, і до покращення її фільтруючих здібностей по відношенню до зовнішніх завад.

**Еквівалентна завадова смуга системи ФАП.** Еквівалентна завадова смуга системи характеризує її якість по відношенню до фільтрації зовнішніх завад і визначається

$$\Delta F_e = \frac{1}{4\pi |W_{01,02}(0)|^2} \int_z W_{01,02}(p) W_{01,02}(-p) dp. \quad (11)$$

Фільтруючі здібності системи ФАП, що досліджується, невідривно пов'язані з точністю стеження, для оцінки якої знайдемо дисперсію фазової помил-

ки стеження

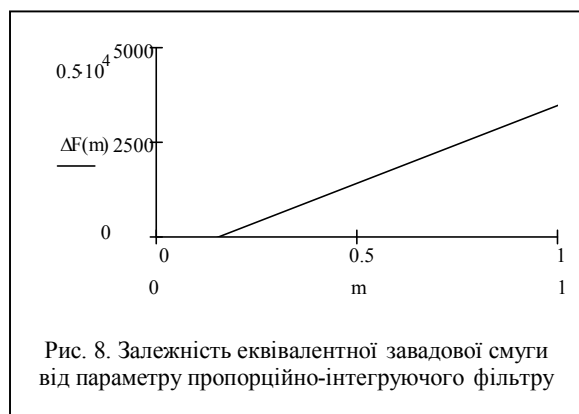
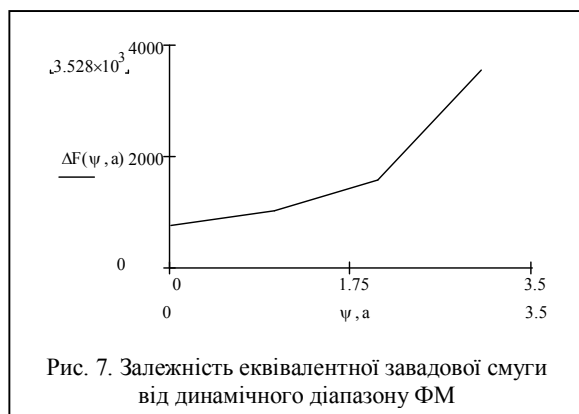
$$\sigma_a^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_a(\omega) |W_{a1,a2}(j\omega)|^2 d\omega, \quad (12)$$

де  $S_a(\omega) = \frac{2\mu\sigma_\lambda^2}{\omega^2 + \mu^2}$  – енергетичний спектр девіації фази вхідного сигналу,  $\mu = 1/\alpha_k$ ;  $\alpha_k$  – постійна часу резонансного контуру.

Флуктуаційна завада представляє собою стаціонарний випадковий процес з нормальним законом розподілення ймовірності та дисперсією  $\sigma_\lambda^2$ . Враховуючи сказане вище, отримуємо:

$$\sigma_\lambda^2 = \frac{1}{2\pi j} \int_z \frac{2\sigma_\lambda^2 \mu}{-p^2 + \mu^2} W_{a1,a2}(p) W_{a1,a2}(-p) dp.$$

Провівши перетворення, отримуємо залежності  $\Delta F_e$  та  $\sigma_a^2$  від параметрів  $\psi$  та  $m$ , які дозволять розкрити їх характер (рис. 7 – 10). З рис. 7 витікає, що еквівалентна завадова смуга  $\Delta F_e$  зменшується при звуженні динамічного діапазону ФМ  $\psi$ .



Крім того, завадова смуга системи ФАП може бути звужена шляхом вибору найменшого значення параметру пропорційно-інтегруючого фільтру  $m$  (рис. 8).

Залежність дисперсії фазової помилки стеження від параметру  $m$  наведена на рис. 9, від  $\psi$  на рис. 10.

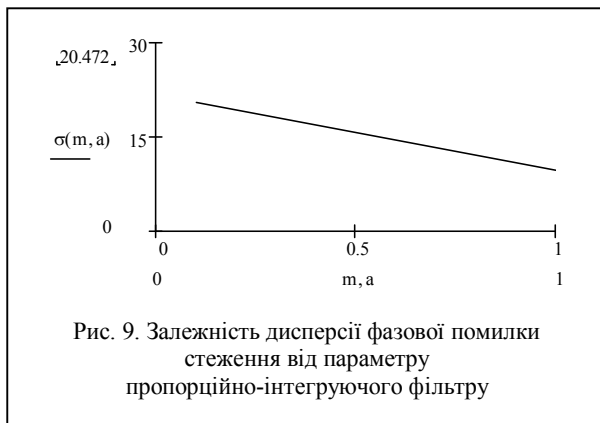


Рис. 9. Залежність дисперсії фазової помилки степеня від параметру пропорційно-інтегруючого фільтра

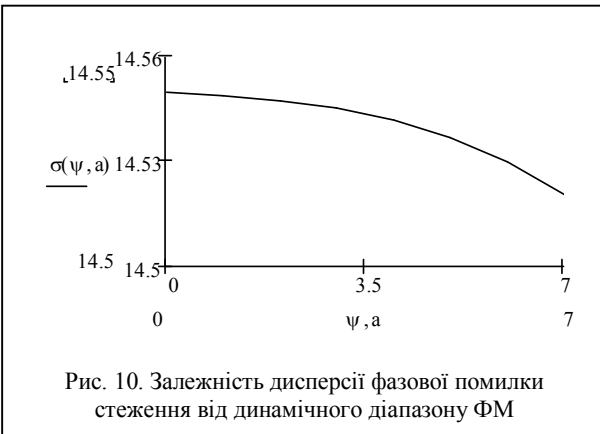


Рис. 10. Залежність дисперсії фазової помилки степеня від динамічного діапазону ФМ

З рис. 9, 10 видно, що збільшення обох параметрів  $m$  і  $\psi$  супроводжується зменшенням дисперсії фазової помилки степеня.

**Час входження в синхронізм системи ФАП.**

Для системи ФАП, що розглядається, час входження в синхронізм складається із трьох складових: час швидкого руху, час проміжного руху і час руху по перехідній траєкторії.

Однак ясно, що ці часи дуже відрізняються за порядком величини, і для практики достатньо обмежитись часом, впродовж якого відбувається перехідний режим, який описується наступним рівнянням

$$\alpha'' + (\alpha + C_1\Omega(\sin \alpha))' + \frac{C_1\Omega}{T_1} \sin \alpha = \frac{\gamma_0\Omega}{T_1}, \quad (13)$$

рішення якого згідно [1] наступне

$$\alpha(t) = \frac{\gamma_0}{C_1} - Ae^{-\frac{t}{T_1}}, \quad (14)$$

де  $A = C_1\Omega$ ;  $\Omega$  – максимальна перестройка ГКН.

Прийmemo, що в системі вже відбулося захоплення, якщо  $\alpha(t) - \frac{\gamma_0}{C_1} < 0,02$ . Тоді час входження в синхронізм не перевищує  $10T_1$ .

Таким чином, можна зробити висновок, що в порівнянні з системою ФАП за лінійним законом адаптації час входження в синхронізм більший на 20% у порівнянні з адаптивною системою ФАП за

нелінійними законами адаптації коефіцієнту підсилення регульованого підсилювача виду:  $\arctg(x)$  та  $\sqrt{x}$ .

**Смуга захоплення удосконаленої системи ФАП.** Під смугою захоплення системи ФАП будемо розуміти величину, яка дорівнює максимальній розстройці по частоті, при якій система ФАП входить в режим синхронізації.

У зв'язку з тим, що після зриву синхронізації в системі ФАП виникають “биття”, розглянемо характер її поведінки у гранично швидкому режимі – режимі, який після спрощення описується рівнянням

$$\frac{p}{C_1\Omega} \alpha + K(p) \sin \alpha - \frac{\gamma_0}{C_1} = 0, \quad (15)$$

де

$$K(p) = \frac{1 + p \left( mT_1 + T_3 - \frac{\psi K_0}{C_1\Omega} \right) + p^2 \left( mT_1T_3 - \frac{\psi K_0T_1}{C_1\Omega} \right)}{1 + p(T_1 + T_3) + T_1T_3p^2}.$$

Тобто система ФАП з фільтром виду:

$$K(p) = \frac{1 + \alpha_1\beta_1p + \alpha_2\beta_2p^2}{1 + \alpha_1p + \alpha_2p^2}, \quad (16)$$

де  $\alpha_1 = T_1 + T_3 \approx T_1$ ;  $\alpha_1\beta_1 = mT_1 + T_3 - \frac{\psi K_0}{C_1\Omega} \approx mT_1$ ;

$$\alpha_2\beta_2 = mT_1T_3 - \frac{\psi K_0T_1}{C_1\Omega} = T_1T_3 \left( m - \frac{\psi K_0}{C_1\Omega T_3} \right);$$

$\alpha_2 = T_1T_3$ , звідки  $\beta_1 \approx m$ ,  $\beta_2 = m - \frac{\psi K_0}{C_1\Omega T_3}$ . Введе-

мо позначення  $\frac{\psi K_0}{C_1\Omega T_3} = \tilde{\xi}$ , тоді отримаємо:

$$\alpha_1 = T_1, \alpha_2 = T_1T_3, \beta_1 = m, \beta_2 = m - \tilde{\xi}.$$

Чисельник та знаменник у (14) не мають загальних коренів, щоб система була глобально асимптотично стійкою, достатньо виконання умов:

$R_e \{K(j\omega) - E | K(j\omega) |^2\} \geq \delta$ ,  $\omega \in ]-\infty; +\infty[$ ,  $4E\delta > \nu$ , де  $E > 0, \delta > 0$  – параметри, які обираються вільно, а

$$\nu = \frac{|\int \varphi(a) da|}{|\int |\varphi(a)| da|}; \varphi(a) = F_1(a) - \frac{\gamma_0}{C_1}, \quad (17)$$

де  $\tilde{\gamma} = \frac{\gamma_0}{C_1}$ ;  $\gamma_0$  – початкова розстройка по частоті.

Для того, щоб смуга захоплення приймала максимальні значення, необхідно, щоб величина  $\nu(\tilde{\gamma})$  була найбільшою.

Підставляючи  $K(p)|_{p=j\omega}$  до нерівності (14), отримаємо:

$$\operatorname{Re} \left\{ \frac{1 + i\omega\alpha_1\beta_1 - \omega^2\alpha_2\beta_2}{1 + i\omega\alpha_1 - \omega^2\alpha_2} - E \frac{(1 - \alpha_2\beta_2\omega^2)^2 + \alpha_1^2\beta_1^2\omega^2}{(1 - \alpha_2\omega^2)^2 + \omega^2\alpha_1^2} \geq \delta \right\}. \quad (18)$$

Поєднуючи отримані умови, остаточно отримаємо наступні умови:

$$\left. \begin{aligned} m - \tilde{\xi} + E(m - \tilde{\xi})^2 + \delta &\geq 0; \\ m - Em^2 - \delta &\geq 0; \\ E + \delta - 1 &\geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Таким чином, для отримання умов захоплення в системі ФАП необхідно знайти такі  $E$  та  $\delta$ , які задовольняють (19) та при цьому забезпечують найбільше значення функції  $f(E, \delta) = E\delta$ . Аналіз системи нерівностей (17) дозволяє отримати необхідні умови виникнення захоплення у швидкому режимі:

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\sqrt{m}}{1+m} > v(\tilde{\gamma}), \text{ при } m - \tilde{\xi} \leq 1; \\ \frac{2\sqrt{m(m-\tilde{\xi})}}{2m-\tilde{\xi}} > v(\tilde{\gamma}), \text{ при } m - \tilde{\xi} \geq 1. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Умови (20) гарантують відсутність биттів у швидкому режимі.

Із (20) витікає, що при малих значеннях динамічного діапазону ФМ  $\psi$ , що визначає ефективність ланцюга зворотного зв'язку по фазі, смуга захоплення визначається, в основному, параметром пропорційно-інтегруючого фільтра  $m$ . Збільшення параметру  $\psi$  до величини, що забезпечує виконання умови  $m - \tilde{\xi} \geq 1$ , веде до того, що умова захоплення в системі ФАП враховує його зміну.

**Статистичні характеристики повільних режимів системи ФАП.** Для математичного описання явищ, що виникають при наявності зовнішнього шуму  $\xi(t)$  як нормального білого шуму з кореляційною функцією  $K_\xi(\tau) = \frac{N_0\delta(\tau)}{2}$  та нульовим середнім значенням, необхідно враховувати його при отриманні вихідних рівнянь.

Запишемо отримане спільне рівняння для обох законів адаптації:

$$\begin{aligned} y^{IV} + y''' \left( \frac{1}{T_3} + \lambda \cos \alpha_s \right) + \frac{C_1\Omega m}{T_3} \cos \alpha_s \times \\ \times \left[ y'' + \left( \frac{1}{mT_2} + \frac{1}{T_1} \right) y' + \frac{1}{mT_2 T_1} y \right] = \\ = -\lambda \left\{ \frac{d^3}{dt^3} + \frac{C_1\Omega m}{\lambda T_3} \times \right. \\ \left. \times \left[ \frac{d^2}{dt^2} + \left( \frac{1}{mT_2} + \frac{1}{T_1} \right) \frac{d}{dt} + \frac{1}{mT_2 T_1} \right] \right\} \times \\ \times \frac{2}{A_m} \xi(t) \sin \omega_0 t, \end{aligned} \quad (21)$$

де для  $\arctg(x)$  –

$$\lambda = C_1\Omega m - \frac{\psi K_0 \left( 1 - \arctg \left( \frac{|\cos \alpha|}{1 + pT_2} \right) \right)}{T_3};$$

для  $\sqrt{x}$  –

$$\lambda = C_1\Omega m - \frac{\psi K_0 \left( 1 - \sqrt{\frac{|\cos \alpha|}{1 + pT_2}} \right)}{T_3},$$

а  $y$  – мала добавка:

$$\alpha(t) = \alpha_s + y(t);$$

$$\sin \alpha \approx \sin \alpha_s + y \cos \alpha_s.$$

Знаючи кореляційну функцію процесу

$$\frac{2}{A_m} \xi(t) \omega_0 t \equiv S(t),$$

визначимо дисперсію фазової помилки стеження

$$D_y = \frac{N_0}{2A_m^2} \cdot \frac{C_1\Omega m + \frac{(\lambda T_3)^2}{T_3} \cos \alpha_s}{\cos \alpha_s (1 + \lambda T_3 \cos \alpha_s)}, \quad (22)$$

де  $A_m$  – амплітуда вхідного сигналу.

Враховуємо тепер, що білий шум – це ідеалізація ширококутового шуму і для оцінок замінимо  $N_0$  на  $4\sigma_K^2\tau_K$ , тоді отримаємо:

$$D_y(t) = 2 \left( \frac{\sigma_K}{A_m} \right)^2 \frac{\tau_K}{T_0}, \quad (23)$$

$$\text{де } T_0 = \frac{\cos \alpha_s (1 + \lambda T_3 \cos \alpha_s)}{C_1\Omega m + \frac{(\lambda T_3)^2}{T_3} \cos \alpha_s}.$$

Розмірність  $\sigma_K$  у (21) співпадає з розмірністю амплітуди вхідного сигналу, тому фактично попереду виразу стоїть величина, зворотна співвідношенню сигнал/шум в квадраті.

Для стійкості системи ФАП у вузлі на підставі критерію “трьох сигма” отримаємо таку умову:

$$1 - \frac{|\gamma_0|}{C_1} > 3\sqrt{2} \frac{\sigma_K}{A_m} \sqrt{\frac{\tau_K}{T_0}}. \quad (24)$$

Таким чином, можна стверджувати, що рівняння (24), яке враховує вплив зовнішнього шуму, лінійне відносно шуму та нелінійне відносно різниці фаз  $\alpha(t)$ . Дисперсія фазової помилки стеження зменшується з ростом амплітуди вхідного сигналу та збільшенні загального коефіцієнту підсилення в ланцюгу зворотного зв'язку по фазі. Отримане обмеження стійкості системи ФАП при впливі адитивного шуму пов'язує величину початкової розстройки з амплітудою вхідного сигналу, енергетичними та кореляційними характеристиками шуму та параметрами системи.

**Шумові характеристики системи ФАП.** При дослідженні шумових характеристик врахуємо шуми, які генеруються функціональними вузлами синтезатора частот, генераторами з електронною перебудовою (або ГКН) і опорними генераторами, зневажаючи на зовнішні впливи, пов'язані з навколишнім середовищем (вібрації, мікрофонний ефект, наводки та ін.) та з джерелами електроживлення.

Враховуючи, що  $\Phi_{OGn}$  – флуктуації фази опорного фазового генератора;  $\Phi_{СДСn}$  – результуючі флуктуації фази на виході синтезатора дрібної сітки;  $\Phi_{n1n}$ ,  $\Phi_{n2n}$ ,  $\Phi_{n3n}$  – флуктуації фази множників частоти з кратністю  $n_1, n_2, n_3$  відповідно;  $\Phi_{ФД1n}$ ,  $\Phi_{ФД2n}$  – еквівалентні флуктуації фази ФД, які визначаються як співвідношення шумової напруги на його виході до крутості характеристики ФД;  $\Phi_{ФНЧ1n}$ ,  $\Phi_{ФНЧ2n}$ ,  $\Phi_{ФНЧ3n}$  – шуми фільтрів, приведені до їх входів;  $\Phi_{ГКНn}$  – флуктуації фази ГКН при фіксованій напрузі на реактивному елементі;  $\Phi_{ФOn}$  – флуктуації фази ФО на  $\frac{\pi}{2}$ ;  $\Phi_{ФМn}$  – еквівалентні флуктуації фази ФМ, які визначаються не лінійністю модуляційної характеристики;  $\Phi_{РПn}$  – флуктуації фази РП; індекс  $n$  – сигнал шуму; застосовуючи метод перетворення Лапласа отримаємо

$$\begin{aligned} \Phi_{1,n} = & \left( N + \frac{m}{M} \right) \Phi_{OGn} + \Phi_{СДСn} + \\ & + \Phi_{ФД1n} + \Phi_{ФНЧ1n} + \Phi_{ФНЧ2n} - \Phi_{ФOn} + \\ & + \Phi_{ФД2n} - \Phi_{ФМn} + [(n_1 + n_2 + n_3) \Phi_{OGn} + \\ & + \Phi_{n1n} + \Phi_{n2n} + \Phi_{n3n} - \\ & - (\Phi_{ЗМ1n} + \Phi_{ЗМ2n} + \Phi_{ЗМ3n}) + \\ & + \Phi_{ФНЧ3n} - \Phi_{РПn}]; \Phi_{2,n} = \Phi_{ГКН}; \Phi_{3,n} = 0. \end{aligned} \quad (25)$$

Тоді результуючі флуктуації фази коливання на виході схеми можна визначити як

$$\Phi_{ВИХ} = W_0(p) \Phi_{1,n} + W_{\Gamma}(p) \Phi_{2,n} + \Phi_{3,n}. \quad (26)$$

Шумові характеристики синтезатора частот потрібно оцінювати після закінчення перехідних процесів в системі фазового автопідстроювання. Вони не мають змісту при несталому значенні вихідної частоти.

У сталому режимі сигнал на виході каналу оцінки стану системи фазового автопідстроювання дорівнює нулю і флуктуаціями фази ФО, ФД2, ФНЧ3 та ФРП можна зневажити.

Враховуючи це, отримаємо наступний вираз для флуктуації фази коливання на виході синтезатора частот:

$$\begin{aligned} \Phi_{ВИХ} = W_0(p) & \left[ \left( N + \frac{m}{M} \right) \Phi_{OGn} + \right. \\ & + \Phi_{СДСn} + \Phi_{ФД1n} + \Phi_{ФНЧ1n} + \\ & + \Phi_{ФНЧ2n} - \Phi_{ФМn} + \\ & + \left. \left( (n_1 + n_2 + n_3) \Phi_{OGn} + \Phi_{n1n} + \right. \right. \\ & + \Phi_{n2n} + \Phi_{n3n} - \\ & \left. \left. - (\Phi_{ЗМ1n} + \Phi_{ЗМ2n} + \Phi_{ЗМ3n}) \right] + W_{\Gamma}(p) \Phi_{ГКНn}. \end{aligned} \quad (27)$$

В порівнянні з базовим синтезатором частот фазові шуми на виході синтезатора частот, що досліджується, доповнюються флуктуаціями фази структурних елементів ланцюга додаткового зворотного зв'язку по фазі, причому при рівності смуги пропускання системи ФАП базової і тієї, що пропонується, по відношенню до внутрішніх або зовнішніх перешкод розходження передаточних функцій  $W_0(p)$  і  $W_{\Gamma}(p)$  можна не враховувати.

## Висновки

Методика визначення основних властивостей адаптивних систем ФАП з нелінійними законами адаптації дозволяє зробити висновок, що частотні характеристики мають виражений резонансний характер, що дозволяє вибирати значення динамічного діапазону ФМ, які задовольняли б поставленим завданням, оптимальний коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача та значення параметру пропорційно-інтегруючого фільтру, яке впливає на величину дисперсії фазової помилки стеження та розмір смуги захоплення системи ФАП.

## Список літератури

1. Макаров С.А., Подоляко К.В. Система фазової автопідстройки з колом зворотного зв'язку, параметри якого регулюються динамічно // 1-й Міжнародний радіоелектронний Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития»: Сб. науч. тр. – Х.: АН ПРЭ, ХНУРЭ, 2002. – С. 494-497.
2. Семенякін С.І., Макаров С.А. Адаптивна система фазової автопідстройки частоти // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Збірник наукових праць. – Х.: НАКУ «ХАІ». – 2002. – Вип. 22. – С. 37-41.
3. Стеклов В.К. Комбинированные системы ФАП. – К.: Техника, 2003. – 323 с.
4. Стеклов В.К., Мирошиников В.В. Анализ нелинейных систем фазовой автоподстройки // Зв'язок. – 2005. – № 1. – С. 60-63.
5. Чекунова О.М., Макаров С.А., Чечуй О.В. Дослідження системи ФАП з нелінійними законами адаптації на стійкість // Системи управління та зв'язок. – 2007. – № 3. – С. 94-97.

Надійшла до редколегії 5.12.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук О.А. Лемешко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.