

# РАДІОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИСТРОЇ

УДК 621.372

Андрій Бондарєв

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра теоретичної радіотехніки і радіовимірювань

## ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ФАПЧ З УРАХУВАННЯМ ПОДІБНОЇ ЗАВАДИ І ШУМУ

© Бондарєв Андрій, 2003

**Для пристроїв ФАПЧ розраховані значення параметрів, оптимальні при спільній дії завад різних типів.**

**In this paper the values of PLL devices parameters, which one are optimum at mutual effect of miscellaneous types of noises are calculated.**

Необхідною передумовою прийому інформації у сучасних приймачах систем зв'язку і радіолокації є синхронізація генератора несучої частоти, яку забезпечує пристрій автоматичної підстройки частоти (ФАПЧ). Пристрій ФАПЧ з пропорційно-інтегруючим фільтром (ПІФ) нижніх частот в колі керування частотою керуючого генератора (КГ) є оптимальним фільтром для сигналу з частотними флуктуаціями на фоні білого шуму [1, 2]. Однак, рекомендації теорії нелінійної оптимальної фільтрації не враховують таких характерних для практики явищ, як регулярні відхилення несучої частоти, притаманні сигналам радіолокації, та наявність і некерованість подібних до корисного сигналу завад в багатоканальних безпроводних мережах. Крім того, критерій мінімальної середньоквадратичної частотної похибки придатний при використанні ФАПЧ як оптимального фільтра, а завданням пристрою синхронізації є відслідковування несучої частоти сигналу в якомога ширшому діапазоні. В зв'язку з цим аналіз і параметричний синтез неоптимальних пристроїв ФАПЧ є важливим для теорії синхронізації та практики проектування приймачів.

Методи аналізу впливу на ФАПЧ шумової завади наведені в [1], гармонічної – в [3], одночасного впливу завад різних типів – в [4], але параметричному синтезу ФАПЧ, тобто вибору відповідних до реального складу завад параметрів пристрою, приділено недостатньо уваги.

Завданням цієї статті є виклад методики вибору оптимальних за різними критеріями параметрів системи ФАПЧ із врахуванням завад різних типів, а також визначення таких параметрів для приймачів деяких систем радіозв'язку і радіолокації.

Математична модель ФАПЧ під дією завад подана в [4] у вигляді системи неавтономних диференціальних рівнянь

$$d\mathbf{X}/d\tau = \mathbf{F}(\mathbf{X}, \tau, \Lambda). \quad (1)$$

Тут  $\mathbf{F}$  – нелінійна вектор-функція,  $\tau$  – нормований час,  $\Lambda$  – вектор параметрів,  $\mathbf{X}$  – вектор кумулянтів, компонентами якого є середні значення, дисперсії та коефіцієнт кореляції частотної і фазової похибок. За відсутності гармонічної завади фазовий простір (1) є п'ятивимірним циліндром, і режиму синхронізації відповідає стаціонарний розв'язок в стійкому фокусі, а при дії гармонічної завади фазовий простір  $(\mathbf{X}, \tau)$  є шестивимірним тором, і син-

хронізм описують періодичні рухи без обертання координати  $m_x$  (середнє значення фазової похибки). Незалежними параметрами, з яких формується вектор  $\Lambda$ , є такі:

- смуга утримання автономної ФАПЧ або контурний коефіцієнт підсилення  $F_{yA}$  (Гц);
- інерційність ПФ (стала часу)  $T$  (с);
- коефіцієнт включення ПФ  $m$  (безрозмірний);
- різниця власної частоти КГ і частоти сигналу (початкове розузгодження)  $F_{\Pi}$  (Гц);
- різниця частот завади і сигналу  $F_3$  (Гц);
- амплітуда завади  $A_3$  (В);
- амплітуда сигналу  $A_0$  (В);
- спектральна густина адитивного шуму  $N_0$  (В<sup>2</sup>/Гц);
- середньоквадратичне відхилення частоти сигналу  $\sigma_{\omega}$  (Гц);
- ширина спектра частотних флуктуацій сигналу  $\alpha$  (Гц).

Доступними для зміни серед цих параметрів є тільки  $F_{yA}$ ,  $T$  і  $m$  – їх і слід підбирати при параметричному синтезі, виходячи з апріорних даних про сигнал і завади. Змінюючи решту параметрів, можна перевірити, які відхилення від передбаченої заводової обстановки допускає спроектована система.

Вважаючи інерційність ФНЧ узгодженою зі спектром частотних флуктуацій, ( $2\pi T = \alpha$ ), перейдемо від фізичних параметрів до нормованих безрозмірних:  $\beta = \alpha/F_{yA}$ ;  $\gamma = F_{\Pi}/F_{yA}$ ;  $\gamma_3 = F_3/F_{yA}$ ;  $\mu = A_3/A_0$ ;  $\rho = A_0^2/(\alpha N_0)$  – відношення сигнал-шум в смузі ПФ;  $D_{\omega} = (\sigma_{\omega}/\alpha)^2$ . Тепер вектор параметрів системи (1) має такі компоненти:  $\Lambda = (\beta, m, \gamma, \gamma_3, \mu, \rho, D_{\omega})$ , з них доступними для параметричного синтезу є тільки  $m$  і  $\beta$ , а максимальні допустимі відхилення інших від номінальних значень можуть бути критерієм оптимальності такого синтезу.

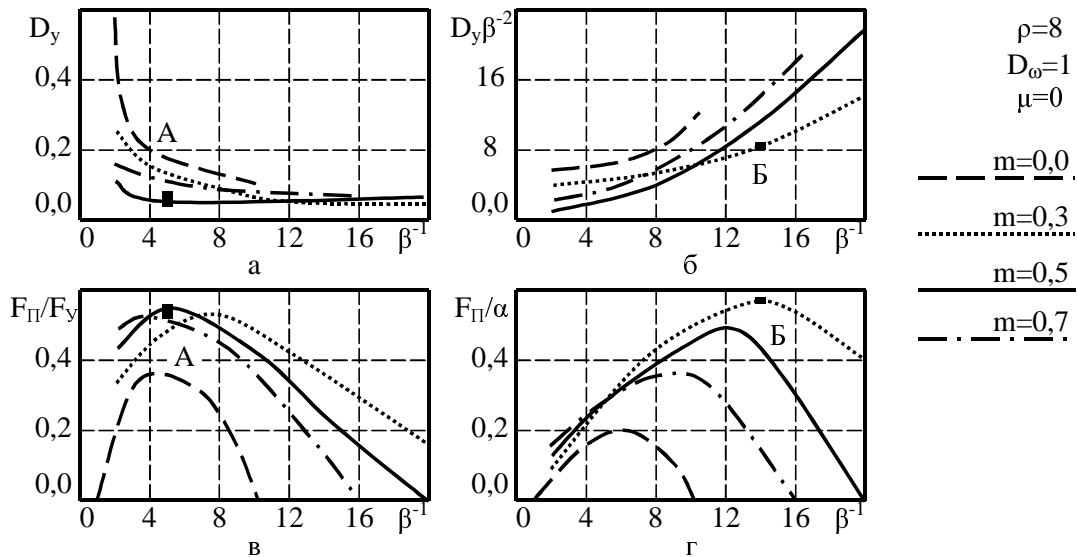


Рис. 1. Параметричний синтез ФАПЧ із врахуванням тільки шумової завади

На рис. 1, а наведено результати розрахунку дисперсії частотної похибки ( $D_y$ ), нормованої до смуги утримання, для різних значень  $m$  і  $\beta$  за відсутності гармонічної завади ( $\mu = 0$ ) і фіксованих параметрах  $\gamma = 0$ ,  $\rho = 8$ ,  $D_{\omega} = 1$ . При  $\mu = 0$  умови існування стаціонарного розв'язку (1) і координати особливої стійкої точки описуються трансцендентними рівняннями, які були розв'язані методом хорд. Мінімум частотної похибки (щоравда, досить невиразний) спостерігається в точці А при значеннях ( $m = 0,5$ ;  $\beta = 0,2$ ), що, як слід було очікувати, збігається з рекомендаціями теорії нелінійної оптимальної фільтрації [1]. При

зменшенні ( $\beta^{-1}$ ) основний внесок в похибку створюють частотні флуктуації сигналу, а при збільшенні – адитивний шум. На рис. 1, *в* для тих самих значень параметрів наведено граничні початкові розузгодження частоти сигналу ( $\gamma$ ), розраховані за методикою [4]. Максимальні відхилення частоти сигналу від номінального значення допускаються при тих самих значеннях параметрів, причому максимум досить виразний, що зменшує помилку при параметричному синтезі за критерієм максимальної шумової смуги утримання. Отже, при підборі нормованих параметрів за мінімумом частотної похибки і максимальним допуском на відхилення результати збігаються.

Однак, враховуючи фізичний зміст параметра  $\beta$ , його можна змінювати тільки зміною контурного коефіцієнта підсилення  $F_{yA}$  при фіксованій узгодженій з корисним сигналом смузі фільтра  $\alpha$ . При цьому змінюється база нормування, а відтак і фізичний зміст результату. На рис. 2, *б* і *г* наведені результати розрахунку дисперсії частотної похибки і допустимого відхилення частоти, нормовані до фіксованого параметра  $\alpha$ . З ростом автономної смуги утримання ( $F_{yA} = \alpha\beta^{-1}$ ) дисперсія частотної похибки монотонно росте, а початкове розузгодження має максимум в точці Б при значеннях параметрів ( $m = 0,3; \beta = 0,06$ ).

Прийнявши ширину спектра частотних флуктуацій  $\alpha = 100$  Гц, можна порахувати, що ФАПЧ з параметрами А ( $F_{yA} = 500$  Гц) відслідковує несучу частоту сигналу в діапазоні  $\pm 275$  Гц при дисперсії  $(140 \text{ Гц})^2$ , а з параметрами Б ( $F_{yA} = 1500$  Гц) – в діапазоні  $\pm 550$  Гц при дисперсії  $(280 \text{ Гц})^2$ . Тобто, оптимальний фільтр слід проектувати за критерієм мінімальної дисперсії частоти, а слідкуючий пристрій синхронізації, для якого втрата синхронізму критичніша, ніж миттєві похибки частоти, – за критерієм максимального допуску.

Наявність гармонічної завади ( $\mu > 0$ ) додатково до умов, накладених шумом, призводить до необхідності зменшення  $F_{yA}$ , особливо при близьких частотах сигналу і завади. Крім того, здатність ФАПЧ з ППФ ( $m > 0$ ) фільтрувати заваду завжди гірша, ніж у ФАПЧ з інтегруючим ФНЧ ( $m = 0$ ). Врахувати ці суперечливі вимоги при одночасній дії завад різних типів дозволив аналіз математичної моделі (1). Стійкі періодичні розв'язки системи (1) знайдені числовим інтегруванням від початкової стаціонарної точки, а умови існування синхронізму – продовженням за параметрами  $\mu, \gamma$ .

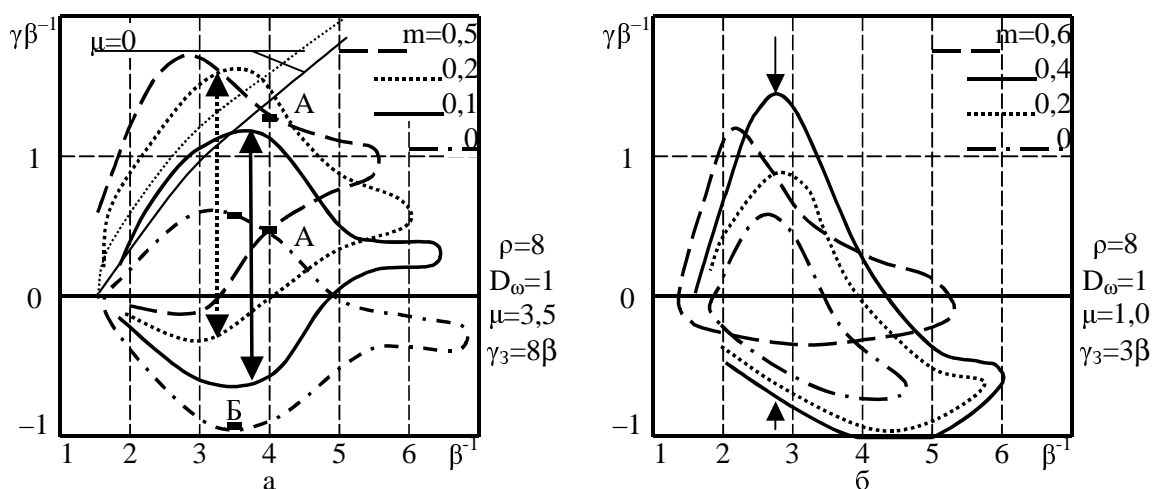


Рис. 2. Параметричний синтез ФАПЧ із врахуванням гармонічної і шумової завад

Типовий приклад параметричного синтезу ФАПЧ при заданих параметрах завад наведено на рис. 2, *а* ( $F_3 = 8\alpha$ ) та 2, *б* ( $F_3 = 3\alpha$ ). Характерною ознакою впливу гармонічної завади на шумову смугу утримання є несиметричність допускових кривих. Вплив випад-

кової завади приводить до того, що синхронізм можливий тільки в певному діапазоні значень контурного коефіцієнта підсилення  $F_{yA} = \alpha\beta^{-1}$ . При великих  $F_{yA}$  синхронізм зривається через зростання шумів в колі керування частотою КГ, а при малих  $F_{yA}$  – через те, що ФАПЧ не встигає відпрацювати швидких флуктуацій частоти сигналу.

За критерієм максимального допуску на рис. 2, а слід обрати параметри ( $F_{yA} = 3,2\alpha$ ;  $m = 0,2$ ), однак це робить можливим зрив синхронізму при раптовому зникненні завади (лінії  $\mu = 0$ ). Максимальний допуск на розузгодження КГ і сигналу при  $\mu \in [0; 3,5]$  забезпечують параметри ( $\beta = 3,7$ ;  $m = 0,1$ ). Для порівняння на рис. 2, а позначено точками А варіант, оптимальний при дії тільки шуму, а точками Б – при дії тільки гармонічної завади. Програш допуску на розузгодження генератора в першому випадку становить 70 %, а в другому – 20 %.

Розглянемо приклад параметричного синтезу ФАПЧ приймача системи зв'язку, для якого задана ширина спектральної смуги частотних флуктуацій ( $\alpha = 1$  кГц) і відношення сигнал-шум в цій смузі ( $\rho = 5$ ) при можливій появі завади, на 40 % потужнішої за сигнал ( $\mu \leq 1,2$ ) і розузгодженої на 800 Гц ( $F_3 = 0,8 \alpha$ ). На рис. 3 наведено деякі з розрахованих допускових кривих, заштриховано область синхронізму з сигналом в усьому діапазоні амплітуд завади. За критерієм максимального допуску обираємо такі параметри ФАПЧ:  $T = 1/(2\pi \alpha) = 160$  мкс;  $F_{yA} = 2$  кГц;  $m = 0,01$ . Крім того, власну частоту КГ слід зсунути на 800 Гц від частоти сигналу в напрямку, протилежному зсуву частоти очікуваної завади. Такі параметри забезпечать слідкування за частотою КГ в діапазоні  $\pm 200$  Гц. Порівняння зсуву частоти подібної завади (800 Гц) і ширини спектра частотних флуктуацій сигналу (1 кГц) показує, що в розглянутому прикладі спектри корисного сигналу і завади перекриваються. Але відповідний вибір параметрів за критерієм максимального допуску дозволяє здійснити синхронізацію з сигналом в такій складній завадовій обстановці за допомогою ФАПЧ другого порядку.

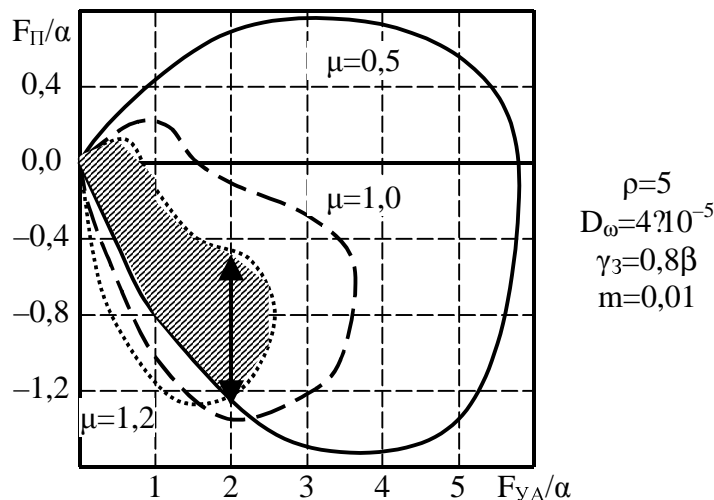


Рис. 3. Параметричний синтез ФАПЧ приймача системи зв'язку

Наступний приклад стосується вибору параметрів пристроїв ФАПЧ напівактивної РЛС із врахуванням пасивної завади (відбиття сигналу підсвічування від району промислової забудови) і широкосмугових шумів. Типові параметри супроводжуваного великого реактивного літака [5] і прийняті припущення щодо високочастотного обладнання РЛС і щодо джерел завад приводять до таких параметрів математичної моделі:  $\alpha = 100$  Гц;  $D_\omega = 0,018$ ;  $\mu = 11,7$ ;  $\rho = 10$ . Результати розрахунків допусків відхилення частоти сигналу

наведено на рис. 4. Інерційність ФНЧ для всіх доплерівських каналів прийнята однаковою:  $T = 1/(2\pi \alpha) = 1,6$  мс, а решта параметрів ( $F_{yA}$  і  $m$ ) визначені за критерієм максимального допуску. При доплерівському зсуві  $F_3 > 1800$  Гц, як видно з рис. 4, вплив пасивної завади несуттєвий, тому і параметри ФАПЧ відповідних каналів розраховуємо, зважаючи тільки на шум. Використання в радіолокаційному приймачі двох каналів з параметрами  $F_{yA1} = 200$  Гц,  $m_1 = 0$ , частота КГ  $F_{КГ} = 900$  Гц та  $F_{yA2} = 325$  Гц,  $m_2 = 0$ ,  $F_{КГ} = 1250$  Гц, а також дванадцяти каналів з параметрами  $F_{yA} = 550$  Гц,  $m = 0,01$  забезпечить відслідковування відбитого сигналу в діапазоні 700 – 10400 Гц, що при робочій довжині хвилі  $\lambda = 3,2$  см відповідає радіальним швидкостям 40 – 600 км/год. При цьому перший канал перекриває діапазон 400 Гц, другий – 500 Гц, а решта – по 800 Гц.

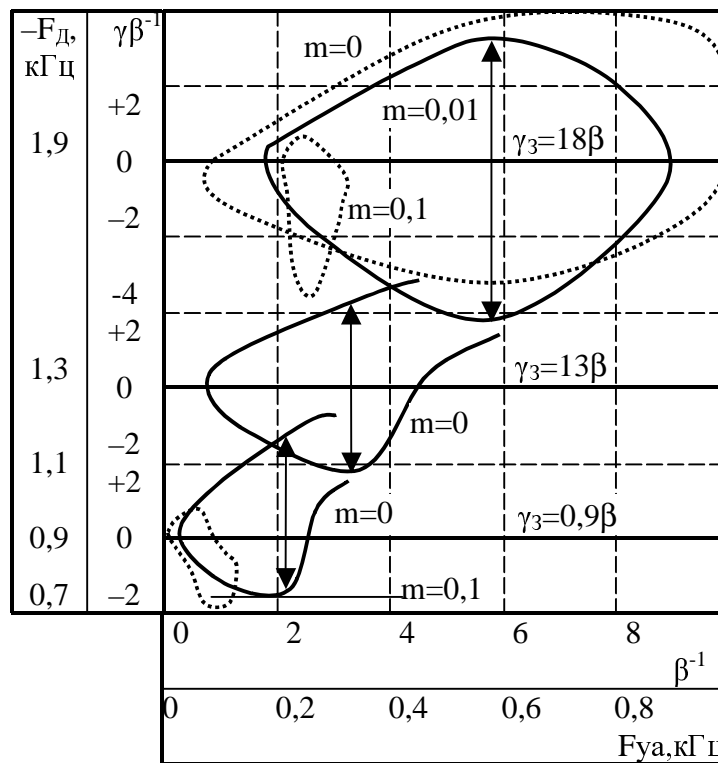


Рис. 4. Параметричний синтез ФАПЧ приймачів багатоканальної РЛС

Наведені результати показують можливість і необхідність одночасного врахування завад різних типів при виборі параметрів пристроїв ФАПЧ. Перспективою застосування методу є визначення рівнів завад, при яких ФАПЧ стає принципово непрацездатною, а також параметричний синтез за критерієм максимального допуску пристроїв синхронізації з більш складною структурою.

1. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Сов.радио, 1977. – 488 с.  
 2. Ярлыков М.С. Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. – М.: Сов. радио, 1980. – 360 с.  
 3. Белюстина Л.Н, Кивелева К.Г., Фрайман Л.А. Качественно-численный метод в исследовании трехмерных нелинейных СФС. Системы фазовой синхронизации. – М.: Радио и связь, 1982. – С. 21 – 44.  
 4. Бондарев А.П., Мандзій Б.А. Аналіз граничної завадостійкості системи фазової синхронізації / Теоретична електротехніка. – 1998. – Вип. 54. – С. 14 – 17.  
 5. Сколник М. Справочник по радиолокации. – М.: Сов. радио. – 1976. – 456 с.