

УДК 621.372

А.П. БондарєвНаціональний університет “Львівська політехніка”,
кафедра теоретичної радіотехніки і радіовимірювань**МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЮ СИНХРОНІЗАЦІЇ
З ПІДВИЩЕНОЮ ЗАВАДОСТІЙКІСТЮ**

© Бондарєв А.П., 2003

Описано пристрій синхронізації з підвищеною завадостійкістю, рекомендації щодо вибору його параметрів та кількісні показники якості синхронізації і завадостійкості.

In this paper the synchronizing device with a heightened noise stability is described, advisories at the choice of its parameters and also quantity indicators of sync quality and noise stability are given.

Постановка проблеми

Невіддільною складовою частиною сучасних приймачів радіосигналів є система слідування за несучою частотою, яку реалізують за допомогою пристрою фазової синхронізації більшої або меншої складності. З теорії оптимальної нелінійної фільтрації випливає, що пристрій фазової синхронізації є оптимальним фільтром для гармонічного сигналу з флуктуаціями частоти на фоні білого шуму. Пристрій синхронізації забезпечує основні показники якості зв'язку та саму можливість прийому інформації. При виборі параметрів і структури пристрою синхронізації необхідно задовольнити суперечливі вимоги: зменшення динамічної похибки синхронізації при зміні частоти сигналу або при фазовій маніпуляції вимагає розширення ефективної смуги пропускання, а зменшення дисперсії випадкової похибки вимагає її звуження. Крім того, при прийомі сигналів малої амплітуди (тобто при високому рівні шумів), розширення смуги пропускання або збільшення інтенсивності шуму призводить не тільки до більшої випадкової помилки, а і до повного зриву синхронізму.

Аналіз останніх досліджень

Основним напрямком досліджень пристроїв синхронізації є вибір оптимальних параметрів як компромісу між динамічною і випадковою похибками [1, 2], питання граничної завадостійкості (тобто максимально припустимої інтенсивності завади) розглянуто в [3]. Структура пристрою з незалежним керуванням завадостійкістю і динамічними властивостями описана в [4], але аналізу якості синхронізації при дії шуму не наведено.

Постановка задачі

Метою цієї статті є аналіз динамічних властивостей і завадостійкості пристрою фазової синхронізації при прийомі фазоманіпульованого сигналу, а також опис способу підвищення завадостійкості пристрою синхронізації. Для підкреслення саме властивостей завадостійкості проведено порівняння пропонованих заходів із найпростішим пристроєм синхронізації – безфільтровим контуром фазового автопідстроювання (рис. 1, а), який складається зі змішувача-перемножувача, підсилювача постійного струму ППС і керованого генератора КГ.

Виклад основного матеріалу дослідження

Основною причиною зриву синхронізму при зростанні інтенсивності шуму у вхідній суміші є обмеженість монотонної ділянки характеристики фазового детектора діапазоном $\pm\pi/2$ (робоча ділянка характеристики). При збільшенні дисперсії фазової похибки із зростанням шуму імовірність виходу різниці фаз за межі $\pm\pi/2$ стає досить великою, керуючий сигнал розузгодження на вході КГ стає недостатнім для компенсації миттєвого розузгодження і синхронізація зривається. У пропонованому пристрої (рис. 1, б) фазове детектування відбувається не на несучій частоті сигналу, а на частоті опорного генератора ОГ, тобто в режимі синхронізму частоти вхідного сигналу і КГ зсунуті на величину частоти ОГ. На виході змішувача встановлений вузькосмуговий фільтр ВСФ, смуга пропускання якого обрана значно вужчою від ширини спектральної смуги вхідних шумів, тому дисперсія фазової похибки на виході ВСФ значно менша, ніж на вході, а, відтак, вихід за межі робочої характеристики ФД відбувається при значно більших інтенсивностях вхідного шуму. При цьому погіршуються і динамічні характеристики пристрою, оскільки зменшується рівень сигналу розузгодження на вході КГ, тому для відновлення динамічних властивостей перед КГ включений фільтр верхніх частот ФВЧ.

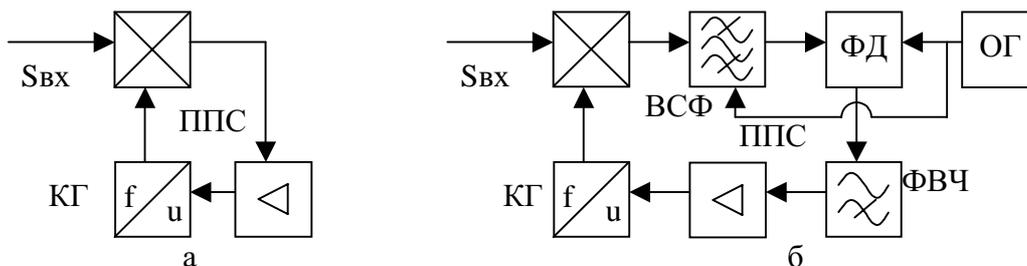


Рис. 1. Безфільтровий (а) і пропонований (б) пристрої синхронізації

Отже, в пристрої рис. 1, б очікується збереження смуги захоплення і динамічних властивостей, притаманних пристрою рис. 1, а, і одночасно зменшення імовірності виходу за межі робочої ділянки фазового детектора зі зривом синхронізму, тобто очікується підвищення завадостійкості.

При аналізі пристрою рис. 1, а в лінійному наближенні [5] отриманий такий вираз для операторної передавальної функції "фаза вхідного сигналу – фаза керованого генератора":

$$W(p) = \frac{1}{1 + \frac{p}{\Omega_y}}, \quad (1)$$

де p – комплексна частота, Ω_y – смуга утримання пристрою (контурний коефіцієнт підсилення). Це означає, що при стрибку фази вхідного сигналу на величину φ_M (наприклад, під час фазової маніпуляції) встановлення фази КГ відбувається за законом

$$\varphi_{КГ}(t) = \varphi_M (1 - e^{-\Omega_y t}), \quad (2)$$

а при тривалості імпульсу фазової маніпуляції τ_i мінімальна фазова похибка становитиме

$$\Delta\varphi_{\min} = \varphi_M - \varphi_{КГ}(\tau_i) = \varphi_M e^{-\Omega_y \tau_i}. \quad (3)$$

При дії білого шуму на вході пристрою дисперсія фазової похибки становитиме

$$D_\varphi = \sigma_\varphi^2 = \frac{N_0}{2A_0^2} \cdot \int_0^\infty W^2(j\omega) d\omega, \quad (4)$$

де σ_φ – середньоквадратичне відхилення фазової похибки, N_0 – спектральна густина потужності шуму, A_0 – амплітуда вхідного сигналу. Виконавши інтегрування (4) з врахуванням (1), отримаємо

$$D_\varphi = \sigma_\varphi^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Omega_y}{\Pi}, \quad (5)$$

де $\Pi = \frac{2A_0^2}{N_0}$ – енергетичний потенціал вхідного сигналу, тобто, ширина смуги частот, в якій

потужності шуму і сигналу однакові. Умова зриву синхронізму ($\sigma_\varphi = \pi/2$) із врахуванням (5) накладає на параметри пристрою і сигналу таке обмеження:

$$\Omega_y / \Pi \leq \pi/2 \approx 1,57. \quad (6)$$

Оцінка граничної завадостійкості (6) отримана в лінійному наближенні. Врахування нелінійних ефектів [3] зумовлює оцінку

$$\Omega_y / \Pi \leq 4/e \approx 1,47, \quad (7)$$

тобто розбіжність в оцінках цілком припустима для опису якісно нових можливостей підвищення завадостійкості, які розглядаються в цій статті. Залежність динамічної (3) і шумової (5) похибок пристрою рис. 1, а від параметрів сигналу і пристрою при індексі маніпуляції $\varphi_M = 1 \text{ рад} = 57^\circ$ зображена на рис. 2. Хрестиками позначені умови зриву синхронізму.

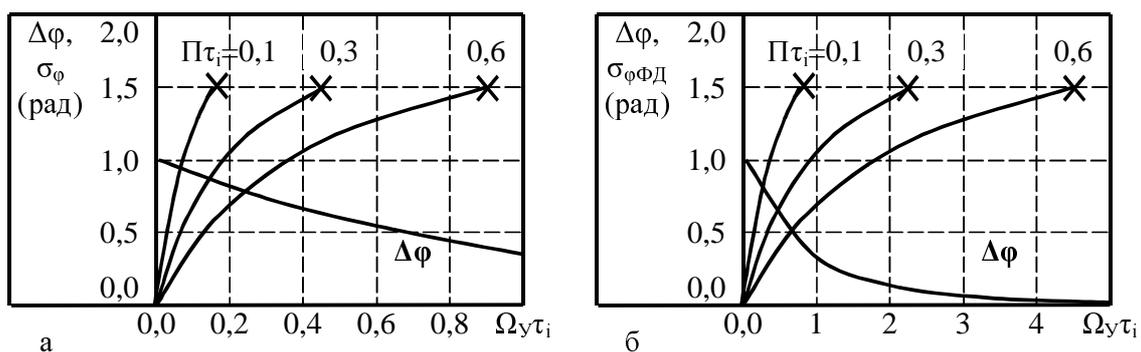


Рис. 2. Динамічна і шумова похибки безфільтрового (а) і пропонованого (б) пристроїв синхронізації

З рис. 2, а видно, що при заданій тривалості імпульсу τ_i зменшити динамічну похибку можна тільки збільшенням контурного коефіцієнта підсилення Ω_y , що в свою чергу призводить до збільшення шумової похибки і навіть до зриву синхронізму, тобто вимагає збільшення енергетичного потенціалу вхідного сигналу.

Для з'ясування динамічних і шумових властивостей пристрою рис. 1, б і вимог до його складових частин розглянемо роботу пристрою в усталеному синхронному режимі. За відсутності завад частота сигналу на виході змішувача дорівнює частоті ОГ, а фаза залежить від різниці частот КГ і вхідного сигналу. Фільтр ВСФ має не вносити фазового зсуву на опорній частоті. Фазовий детектор ФД перетворює фазу сигналу на виході ВСФ в постійну напругу, яка через ФВЧ надходить на керуючий вхід КГ і підтримує постійну різницю частот вхідного сигналу і КГ. Отже, ФВЧ має забезпечувати скінченне (ненульове) значення передавальної функції на нульовій частоті.

При стрибку фази на φ_M (наприклад, при фазовій маніпуляції) фаза сигналу на виході змішувача зміниться стрибком також на φ_M . Для передавання цього стрибка на вхід ФД

необхідно забезпечити ненульову передавальну функцію ВСФ на частотах, далеких від резонансної (від частоти ОГ). При цьому фаза сигналу на виході ВСФ стрибком зміниться на невелике значення, а потім наростатиме до значення φ_M за час, визначений постійною часу ВСФ. За таким самим законом (невеликий стрибок і поступове наростання) буде змінюватись напруга на виходах ФД та ППС. На вихід ФВЧ початковий стрибок напруги буде переданий без змін, а подальше наростання послабиться і в усталеному режимі керуюча напруга пропорційна передавальній функції ФВЧ на нульовій частоті.

Отже, узгодженням параметрів ВСФ і ФВЧ можна досягнути того, що стрибок фази вхідного сигналу φ_M передається миттєво і без змін на вхід КГ, а перехідні процеси відбуватимуться лише в фільтрах. Покажемо можливість такого узгодження на прикладі використання в якості ВСФ синхронно-фазового фільтра з пропорційно-інтегруючими ФНЧ в квадратурних каналах (рис. 3).

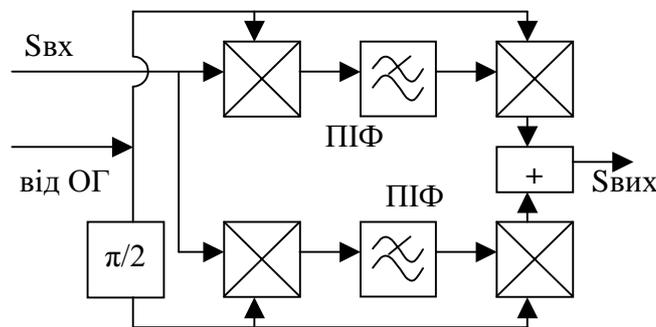


Рис. 3. Синхронно-фазовий вузькосмуговий фільтр

Комплексна передавальна функція такого фільтра по напрузі становить

$$K_1(j\omega) = \frac{1 + j(\omega - \omega_{\text{ОГ}})mT}{1 + j(\omega - \omega_{\text{ОГ}})T}, \quad (8)$$

де T – постійна часу пропорційно-інтегруючого фільтра (ПФ), m – його коефіцієнт включення, $\omega_{\text{ОГ}}$ – кругова частота опорного генератора. Фільтр ВСФ разом зі змішувачем і фазовим детектором ФД є суттєво нелінійним пристроєм, тому для визначення перехідної характеристики "фаза вхідного сигналу – напруга на виході ФД" було застосовано імітаційне моделювання з використанням спеціально створеної комп'ютерної програми.

Результати моделювання при коефіцієнті включення $m=0,2$ зображені на рис. 4 для величин стрибка фази на вході $\varphi_M = 30^\circ, 60^\circ$ і 90° (криві 1, 2, 3 відповідно) при розімкненому контурі керування. Аналіз нормованих перехідних характеристик показує, що при стрибках фази $\varphi_M < 1$ рад, вони з достатньою для практики точністю зображаються з перехідними характеристиками ПФ в квадратурних каналах ВСФ. Отже, при використанні пропорційно-диференціюючого ФВЧ з передавальною функцією

$$K_2(j\omega) = \frac{m + j\omega mT}{1 + j\omega mT} \quad (9)$$

і ППС з коефіцієнтом підсилення $1/m$, стрибок фази вхідного сигналу буде переданий на вхід КГ з таким самим коефіцієнтом, як і в пристрої на рис. 1, а.

На рис. 4 показані перехідна характеристика ФВЧ з передавальною функцією (9) (крива 4) і часова залежність вхідної напруги ППС (пряма 5). Отже, зовнішні характеристики пристрою рис. 1, б в усталеному синхронному режимі і при перехідному процесі, зумовлені

ному фазовою маніпуляцією, повністю збігаються з характеристиками пристрою рис 1, а, а його смуга пропускання (1) і динамічні характеристики визначає контурний коефіцієнт передачі Ω_y .

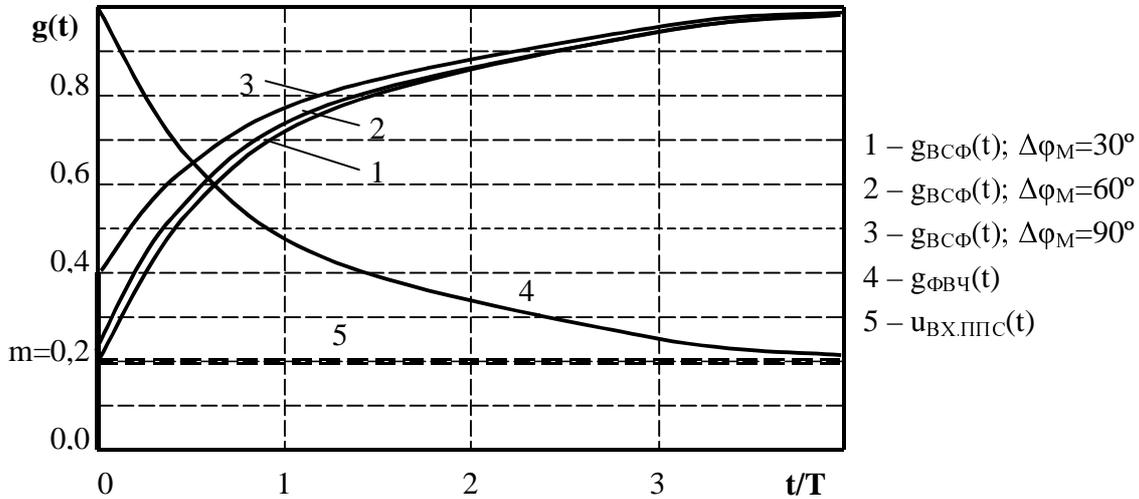


Рис. 4. Перехідні характеристики ВСФ-ФД і ФВЧ

При аналізі впливу шумової завади і умов зриву синхронізму врахуємо, що сигнал на вході змішувача, як і в пристрої рис. 1, а, є випадковим процесом з дисперсією фази D_φ (5) і шириною спектральної смуги Ω_y . При проходженні такого сигналу через вузькосмуговий фільтр ВСФ з односторонньою смугою пропускання $1/T$, в лінійному наближенні дисперсія фази на виході становитиме

$$D_{\varphi\text{ФД}} = \sigma_{\varphi\text{ФД}}^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Omega_y}{\Pi} \left(m^2 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1-m^2}{\Omega_y T} \right). \quad (10)$$

Значення динамічної похибки пристрою рис 1, б та середньоквадратичне відхилення фази на вході ФД показані на рис. 2, б для значень параметрів $\varphi_M=1$ рад; $m=0,2$; $\Omega_y T=10$. З рис. 2, б видно, що похибки і дисперсії такі самі, як в пристрої рис. 1, а, але зрив синхронізму настає при значно більших значеннях Ω_y , що дозволяє зменшити динамічну похибку і досягати синхронізації при менших значеннях енергетичного потенціалу Π вхідного сигналу, тобто підвищити завадостійкість пристрою. Наприклад, при значеннях $\Pi\tau_i=0,1$, пристрій рис. 1, а дозволяє зменшити динамічну похибку до 0,9 рад, а пристрій рис. 1, б – до 0,45 рад. Умови зриву синхронізму (6, 7) набувають вигляду $\Pi \geq 7,5 \Omega_y$, тобто завадостійкість пристрою збільшена приблизно в 5 разів.

Значення параметрів, при яких побудовані залежності рис. 2, б, обрані виключно з міркувань наочності. Зменшенням параметра m і збільшенням інерційності T можна досягнути більш значного підвищення завадостійкості, але застосоване лінійне наближення не дозволяє з'ясувати границі такого підвищення.

Висновки і перспективи наукових розвідок

Отже, описаний у статті пристрій синхронізації дозволяє незалежно регулювати динамічні властивості (змінюючи контурного коефіцієнта підсилення Ω_y) і завадостійкість (змінюючи параметри ВСФ), показана можливість реалізації такого пристрою, розраховані показники завадостійкості. Подальші дослідження дозволять з'ясувати вплив нелінійностей

на характеристики пристрою та можливості підвищення завадостійкості в часто використовуваних пристроях синхронізації з ФНЧ в колі керування.

1. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М., 1977. 2. Ярлыков М.С. Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. – М., 1980. 3. Бондарев А.П., Мандзій Б.А. Аналіз граничної завадостійкості системи фазової синхронізації // Теоретична електротехніка. – 1998. – Вип. 54. – С. 14–17. 4. А. с. 1775855. Устройство фаовой автоподстройки частоты / М.С. Мартыниев, А.П. Бондарев, С.Л. Малиновский, М.П. Возняк. Приоритет 15.07.1992. 5. Кантор Л.Я. Помехоустойчивость приема ЧМ сигналов. – М., 1977.

УДК 621.316.761.2

Ю.О. Варецький, Я.С. Пазина, В.М. Амброз
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електричних мереж та систем

ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ФІЛЬТРАМИ ВИЩИХ ГАРМОНІК

© Варецький Ю.О., Пазина Я.С., Амброз В.М., 2003

Запропоновано підхід до оцінки параметрів системи фільтрів для електричної мережі, яка живить навантаження зі змінним характером нелінійності. Показано особливості розрахунку для випадку заданого рівня компенсації реактивної потужності та потужності електричної мережі.

The paper shows an approach to estimation of power filters system for electrical network supplying loads having a varying harmonic nonlinearity. The features of the calculation for a reactive power compensation level and for a short circuit level are shown.

Постановка проблеми

Останнім часом спостерігається швидке зростання застосування високовольтних силових фільтрів у системах електропостачання промислових споживачів, що пояснюється своєю чергою зростанням потужностей нелінійних навантажень. Часто ці навантаження мають змінний характер, що висуває додаткові вимоги до проектування системи фільтрів, які призначені для таких мереж. Особливість полягає у тому, що необхідно враховувати не тільки характеристики зміни режиму електричної мережі зі зміною компенсованих струмів гармонік, але оцінювати також і вплив цієї системи фільтрів на струми некомпенсованих гармонік, які можуть мати іноді значні величини. Впровадження статичних тиристорних компенсаторів (СТК), які дозволяють одночасно покращувати декілька показників якості в системах живлення неконвенційних навантажень, висуває в цьому напрямі особливі вимоги. У схемах СТК використовується, як правило, декілька фільтрів вищих гармонік, які прийнято називати фільтро-компенсуючим колом (ФКК), тому доцільний розподіл потужності між окремими фільтрами є важливою технічною і економічною задачею.