

ВПЛИВ ФАЗОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ГЕНЕРАТОРІВ НА ПАРАМЕТРИ РОБОТИ СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ НА ФОНІ АДТИВНОГО ГАУСІВСЬКОГО ШУМУ ТА ДОПЛЕРІВСЬКОГО ЗМІЩЕННЯ ЧАСТОТИ

Предметом вивчення в статті є системи фазової синхронізації радіотехнічних пристроїв техніки зв'язку. Метою статті є теоретичні дослідження в напрямку розробки, аналізу та удосконалення відомих і синтез нових схем фазової синхронізації, що характеризуються високою завадостійкістю, точністю і швидкодією при простоті конструкції. Задача, що вирішується – дослідити можливості замкнутої та комбінованої систем синхронізації, щодо роботи в умовах фазової нестабільності генераторів в каналі зв'язку на фоні зовнішнього адитивного гаусівського шуму та доплерівського зміщення частоти. Отримані наступні результати. Проведено аналіз систем синхронізації замкнутого типу при роботі в умовах фазової нестабільності генераторів та показана їй невідповідність щодо мінімізації дисперсії фазової помилки та підвищення динаміки під час стеження за несучою частотою. Проведено уточнення процесу синтезу розімкнутого зв'язку в комбінованій системі синхронізації та запропоновані аналітичні залежності, що дозволяють уточнити методику синтезу розімкненого зв'язку для комбінованої системи синхронізації з врахуванням фазової нестабільності генераторів на фоні впливу адитивного гаусівського шуму та доплерівського зміщення частоти. Висновки. Збільшення шумової смуги пропускання пропорційно-інтегруючого фільтра вхідного сигналу системи фазової синхронізації закритого типу до параметрів ідеального фільтра в умовах фазової нестабільності генераторів погіршує динаміку вказаної системи. Для комбінованої системи синхронізації, в умовах фазової нестабільності генераторів, збільшення шумової смуги пропускання вхідного сигналу можна досягнути застосувавши в замкнутому контурі пропорційно-інтегруючий фільтр та здійснивши відповідний підбір параметрів передавальної функції ланки розімкненого каналу. В умовах фазової нестабільності генераторів в комбінованій системі синхронізації шляхом підбором параметрів пропорційно-інтегруючого фільтра можна забезпечити необхідну динаміку системи та досягти збереження оптимального значення дисперсії фазової помилки в ній. Врахування доплерівського шуму в умовах фазової нестабільності генераторів для системи синхронізації замкнутого типу та комбінованої системи синхронізації вимагає зменшення оптимального значення шумової смуги пропускання.

Ключові слова. синхронізація несучої частоти, система синхронізації замкнутого типу, комбінована система синхронізації, фазова нестабільності генератора, що підлаштовується.

Вступ. Постановка задачі. У різні радіотехнічні пристрої техніки зв'язку, радіолокації і управління а також в пристрої точного магнітного запису широко впроваджені системи фазової синхронізації. Зокрема, в фазокогерентних системах телекомунікації і управління вони застосовуються для відновлення несучої і тактовою частот та для когерентної демодуляції аналогових і цифрових сигналів з кутовою модуляцією [1].

Робота систем синхронізації характеризується впливом ряду збурень та шумів на їх роботу. А саме адитивного флуктуаційного шуму, збурення корисної кутовий модуляції (в разі фільтрації несучої частоти), стрибків фази і частоти та інших. В лініях космічного зв'язку, наприклад, основними зовнішніми збуреннями є адитивний гауссовський шум і доплерівські зміщення частоти.

Поряд з зовнішнім впливом на якість роботи системи фазової синхронізації можуть чинити і внутрішні збурення, основними з яких в фазокогерентних системах є нестабільності генератора, що підлаштовується [2]. Системи синхронізації, що працюють в таких умовах, повинні характеризуватися малою дисперсією фазової помилки і високою швидкодією. Очевидно, що для ефективної роботи радіопристрою в цілому, в тому числі, необхідно

безпосередньо забезпечити високу точність роботи системи фазової синхронізації в сталому і перехідному режимах під впливом як зовнішніх так і внутрішніх збурень [1].

Питання визначення напрямків розробки, аналізу та удосконалення відомих систем синхронізації замкнутого типу (ЗСС) і синтез нових комбінованих схем синхронізації (КСС), що характеризуються високою завадостійкістю, точністю і швидкодією при роботі під впливом як зовнішніх так і внутрішніх збурень є актуальним та своєчасним науковим завданням

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання аналізу відомих та розробки нових схем систем фазової синхронізації з врахуванням різних джерел збурень розглядалися в ряді наукових робіт.

У роботі [3] поданий алгоритм оцінки фазового шуму на основі застосування розрахункових коефіцієнтів розрізненого дискретно - косинусного перетворення та запропоновано ряд реалізацій запропонованого алгоритму. Алгоритм враховує як зміщення несучої частоти так і фазовий шум, але оцінку впливу внутрішніх чинників, а саме нестабільність роботи генератора, що підлаштовується на ефективність роботи системи синхронізації запропонований алгоритм не враховує.

У роботі [4] подані результати дослідження КСС з розімкнутим зв'язком при умові впливу зовнішніх збурень. Відмічено, що на відміну від простих КСС, перспективна комбінована система автоматичного регулювання в якій пропонується синтез розімкнутої зв'язку при умові підвищення порядку астатизму має свої особливості, зумовлені специфічними вхідними вузлами замкнутого і розімкнутому каналів управління. В даній роботі відсутня оцінка можливостей таких КСС по підвищенню ефективності роботи з врахуванням нестабільності роботи генераторів в каналі зв'язку.

У роботах [5 - 7] досліджено оптимізацію параметрів фільтра і системи в цілому для класу ЗСС. Отримані результати показали, що ЗСС через властивих їм протиріч не дозволяють в ряді випадків забезпечити необхідну якість роботи. Це особливо відчутно, коли потрібно поліпшити якість системи по двом і більше суперечливим показникам. Вплив нестабільності генераторів в даних роботах не оцінювався.

Великі можливості щодо поліпшення якості систем синхронізації є в класі КСС, які можуть поєднувати принципи регулювання по відхиленню і збуренню, що визначалось в якості перспективних напрямків удосконалення систем синхронізації в роботах [1,8]. В роботі [8] визначена важливість оцінки впливу нестабільності генераторів, ала безпосередньо в ній та в роботі [1] оцінка впливу нестабільності генераторів відсутня

У таких роботах по КСС, як [9, 10], в основному проводиться аналіз динаміки КСС при простому розімкнутому зв'язку, що складається з частотного дискримінатора (ЧД) і різних фільтрів (або без них), без урахування шуму як від зовнішніх так і від внутрішніх джерел.

В роботі [11] відмічено, що вплив нестабільності генераторів може бути суттєвим. Його врахування та мінімізація може бути одним з напрямків підвищення ефективності системи фазової синхронізації. Оцінка впливу вказаної нестабільності в даній роботі не викладена.

Мета і завдання даного дослідження. Завдання оцінки впливу нестабільністю роботи генераторів в каналі зв'язку на ефективності роботи ЗСС та КСС при умові впливу зовнішнього аддитивного гаусівського шуму та доплерівського зміщення частоти, на даний час не вирішувалися та є актуальною науковою задачею, розв'язанню якої присвячена дана стаття.

У загальному випадку фазова модуляція сигналу містить чотири складові [12]:

$$\varphi_{\text{вх}}(t) = d(t) + M(t) + \Delta\psi(t) + N(t), \quad (1)$$

де $d(t)$ – доплерівський зсув на вході;

$M(t)$ – корисна кутова модуляція;

$\Delta\psi(t)$ – нестабільність генераторів.

При когерентному прийомі необхідне точне знання поточної фази несучого коливання. При використанні системи синхронізації як фільтру фази, вхідним сигналом ϵ , у відповідності до виразу (1) сума $d(t) + \Delta\psi(t)$, де $\Delta\psi(t) = \psi_1(t) - \psi_2(t)$, $\psi_2(t)$ - нестабільності генератора, що підлаштовується. Процеси $M(t)$ і $N(t)$ представляють в даному випадку перешкоду.

Дисперсія фазової помилки складається, таким чином, з чотирьох компонентів [13]:

$$\sigma_\phi^2 = \sigma_d^2 + \sigma_{\Delta\phi}^2 + \sigma_M^2 + \sigma_N^2, \quad (2)$$

кожна з яких відповідно до спектральної теорії визначається наступним чином:

$$\sigma_1^2 = \sigma_d^2 + \sigma_{\Delta\phi}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_\phi(j\omega)|^2 G_s(\omega) d\omega, \quad (3)$$

$$\sigma_2^2 = \sigma_M^2 + \sigma_N^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_\phi(j\omega)|^2 G_n(\omega) d\omega, \quad (4)$$

де $W(S) = 1 - W_\phi(S)$.

Для даного випадку $G_s(\omega) = G_d(\omega) + G_{\Delta\phi}(\omega)$, $G_n(\omega) = G_M(\omega) + G_N(\omega)$.

Передавальна функція по помилці ЗСС визначена виразом (5) [4, 14]:

$$W(S) = \frac{1}{1 + W_1(S)W_2(S)W_3(S)} = \frac{T_2(S+1)S}{a_0S^2 + a_1S + a_2} = \frac{D_{\phi30}(S)S^{\nu_3}}{F_3(S)}, \quad (5)$$

отже, передавальна функція $W_3(S)$ буде:

$$W_3(S) = [W_1(S)W_2(S)W_3(S)] / [1 + W_1(S)W_2(S)W_3(S)]. \quad 6$$

З виразів (5), (6) видно, що мінімізувати величину σ_ϕ^2 можна лише шляхом відповідного підбору параметрів ланок $W_1(S) - W_3(S)$. Оскільки ці параметри входять в характеристичне рівняння ЗСС $F_3(S) = 0$, то зміна їх з метою зменшити дисперсію фазової помилки погіршить якість перехідного процесу в системі ЗСС [3].

Визначимо можливості мінімізації дисперсії фазової помилки в КСС і методику синтезу розімкненого зв'язку з умови $\min \sigma_\phi^2$.

Структурна схема лінійної моделі КСС з додатковою ланкою, прийнята для дослідження, показана на рис. 1.

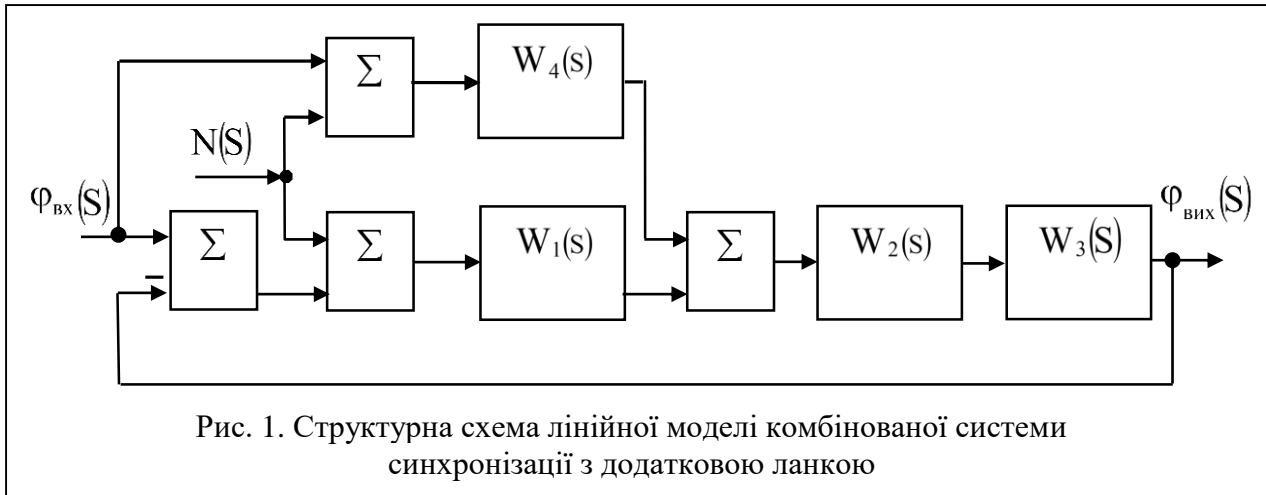


Рис. 1. Структурна схема лінійної моделі комбінованої системи синхронізації з додатковою ланкою

Відповідно до передавальної функції по помилці КСС з виразу (5) знайдемо [4, 14]:

$$W_k(s) = \frac{[D_1(s)D_2(s)F_4(s) + F_1(s)F_2(s)D_4(s)]D_3(s)}{[F_1(s)F_2(s)F_3(s) + D_1(s)D_2(s)D_3(s)]F_4(s)} = \frac{D_k(s)}{F_k(s)}, \quad (7)$$

де $F_k(s) = F_3(s) \times F_4(s)$.

Оскільки в чисельники передавальних функцій КСС, заданих виразами (5), (7) входять поліноми $F_4(s)$, $D_4(s)$ додатково розімкненої ланки, то шляхом відповідного вибору їх параметрів можна додатково мінімізувати дисперсію фазової помилки. Прийmemo до уваги, що поліном $F_4(s)$ входить в характеристичне рівняння КСС у вигляді співмножника, тому корені, що вносяться ним, можна вибрати так, щоб вони не впливали на перехідний процес початкової системи. Якщо вимагати, щоб виконувалася умова:

$$F_4(s) = F_1(s)F_2(s), \quad (8)$$

то передавальні функції КСС по помилці і по вихідному сигналу відповідно будуть:

$$W_{\text{фк}}(s) = \frac{F_1(s)F_4(s) + D_3(s)D_4(s)}{F_1(s)F_2(s)F_3(s) + D_1(s)D_2(s)D_3(s)} = \frac{D_{\text{фк}}(s)}{F_3(s)}, \quad (9)$$

$$W_k(s) = \frac{[D_1(s)D_2(s) + D_4(s)]D_3(s)}{F_1(s)F_2(s)F_3(s) + D_1(s)D_2(s)D_3(s)} = \frac{D_k(s)}{F_3(s)} \quad (10)$$

У цьому випадку характеристичні рівняння ЗСС і КСС однакові, тобто $F_k(s) = F_3(s)$ і розімкнений зв'язок $W_4(s)$ можна синтезувати тільки з умови $\min \sigma_{\varphi}^2$.

Розглянемо випадок стеження за несучою частотою на фоні шуму при $d(t) = M(t) = 0$, і порівняємо можливості мінімізації дисперсії фазової помилки в ЗСС і КСС.

Якщо потрібно врахувати компоненту $d(t)$, то необхідно розглядати спектри

$$G_s(\omega) = G_d(\omega) + G_{\Delta\phi}(\omega), \quad G_n(\omega) = G_M(\omega) + G_N(\omega). \quad (11)$$

Як відомо [2, 15] енергетичний спектр нестабільностей генераторів може бути представлений у вигляді:

$$G_{\Delta\phi}(\omega) = N_T + (2\pi N_f)/|j\omega|, \quad (12)$$

де N_T , N_f – постійні, що характеризують тепловий шум і шум типу $1/f$ відповідно.

У цьому випадку вираз для дисперсії фазової помилки в ЗСС буде [13]:

$$\sigma_{\phi_3}^2 = \sigma_{\Delta\psi}^2 + \sigma_N^2 = \frac{r+1}{4r} \frac{N_T}{W_{L3}} + G(r) \frac{N_f}{W_{L3}^2} + \frac{N_0 W_{L3}}{2A_0^2}, \quad (13)$$

де $r = (A_0 K T_1^2)/T_2$, $W_{L3\Pi\Phi} = (r+1)/[2T_1(1+T_1/rT_2)]$ двостороння шумова смуга пропорційно-інтегруючого фільтра (ПІФ), $G(r) \approx 1,5$.

З цього виразу видно, що зміна шумової смуги по різному впливає на величину дисперсії фазової помилки, яка викликана нестабільністю генераторів і адитивним шумом.

Якщо взяти похідну по W_{L3} і прирівняти її до нуля, знайдемо W_{L3OPT} , аналіз якого показує, що мінімум дисперсії фазової помилки отримуємо при включенні в замкнутий контур ідеального фільтра (ІФ) замість пропорційно-інтегруючого фільтра (ПІФ), що, як було показано в [3], погіршує динаміку системи ЗСС.

При $P_c/P = 6 \times 10^4$, $N_T = 0$, $N_f = 0,08$ оптимальними з точки зору $\min \sigma_{\phi}^2$ будуть наступні значення $r = 7$; $W_{L3} = 26$ Гц. При цьому отримуємо $G(r) = 1,6$, $\sigma_{\phi} = \sqrt{\sigma_{\phi}^2} = 1,93^\circ$.

Включення в ЗСС ІФ замість ПІФ дещо розширює шумову смугу системи [3]. Дійсно, $W_{L3IF} \approx (r+1)/(2T_1)$ і $W_{L3IF}/W_{L3\Pi\Phi} = 1 + T_1/(rT_2) \geq 1$.

Таке ж збільшення шумової смуги можна отримати при ПІФ в замкнутому контурі шляхом відповідного вибору параметрів розімкненого каналу.

Визначимо вид і параметри ланки $W_4(S)$ розімкненого зв'язку, що дозволяє отримати КСС з такою ж смугою як ЗСС з ІФ, але при ПІФ в замкнутому контурі, параметри якого можуть бути вибрані з умови забезпечення необхідної якості динаміки системи. Іншими словами будемо синтезувати розімкнений зв'язок з умови:

$$W_{LK} = W_{L3IF}, \quad (14)$$

що дозволить оптимізувати систему по мінімуму дисперсії фазової помилки без погіршення динаміки.

На рис. 1 позначені: $W_1(S)$ – передавальна функція фазового дискримінатора (ФД), $W_2(S)$ – фільтру (Ф), $W_3(S)$ – генератора, що підлаштовується (ПГ), які мають наступний вигляд [4]:

$$W_1(S) = K_1 + \left(\frac{D_1(S)}{F_1(S)} \right) \quad W_3(S) = K_3/S = D_3(S)/F_3(S), \quad (15)$$

де $K_1 = A_1 K_{\text{Фд}}$;

K_1 – коефіцієнт підсилення ПГ;

S – оператор Лапласа.

Надалі розглядатимемо системи синхронізації з ППФ в замкнутому контурі з передавальною функцією виду [14]:

$$W_2(S) = \frac{(T_1 S + 1)}{(T_2 S + 1)} \quad (16)$$

Загальний вигляд передавальної функції $W_4(S)$ розімкнутого зв'язку, що задовольняє умові забезпечує $v_k = 1$ визначається виразом [4, 14]:

$$W_4(S) = \frac{\left(\sum_{i=v_3}^n K_{4i} S^i \right)}{\left(\sum_{j=0}^m T_{4j} S^j \right)} = D_4(S) / F_4(S) \quad (17)$$

де v_3 – порядок астатизму вихідної системи без зв'язку.

Якщо в формули (9), (10) підставити вирази для передавальних функцій ланок системи рис. 1 з (15), (16) і (17), при $n=1$, отримаємо:

$$W_{\text{ФК}}(S) = (b_0 S^2 + b_1 S) / (a_0 S^2 + a_1 S + a_2) = D_{\text{ФК}}(S) / F_3(S) \quad (18)$$

$$W_K(S) = (C_0 S + C_1) / (a_0 S + a_1 S + a_2) = D_K(S) / F_3(S) \quad (19)$$

де $b_0 = T_2$, $b_1 = 1 - K_3 K_4$, $G_1 = A_0 K_1 K_3$, $G_0 = A_0 K_1 T_1 + K_3 K_4$.

Двостороння шумова смуга КСС з ППФ в замкнутому контурі буде [16].

$$W_{\text{LK}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_K(j\omega)|^2 d\omega = W_{\text{L3ПФ}} + \Delta W_L \quad (20)$$

$$W_L = \frac{\beta^2 r (K_3 K_4)^2 + 2\beta r (K_3 K_4)}{2T_1(1 + \beta)} \quad (21)$$

де $\beta = T_1 / (r T_2)$.

З умови (14) знаходимо необхідне значення ΔW_L . З урахуванням виразів ΔW_L ІФ і ΔW_{L3} ППФ маємо:

$$\Delta W_L = W_{\text{L3ИФ}} - W_{\text{L3ПФ}} = \beta(r + 1) / [2T_1(1 + \beta)] \quad (22)$$

Порівнюючи вирази (21) і (22), отримаємо наступне рівняння:

$$\alpha_0(K_3 K_4)^2 + \alpha_1(K_3 K_4) + \alpha_2 = 0, \quad (23)$$

$$\text{де } \alpha_0 = \beta^2 r; \alpha_1 = 2\beta r; \alpha_2 = -\beta(r+1).$$

Якщо розв'язати рівняння (23), знайдемо значення параметра K_4 , при якому забезпечується оптимальна передавальна функція КСС з умови $\min \sigma_\varphi^2$ при необхідній якості динаміки системи.

Для наведених вище числових значень маємо $K_4 = 57 / K_3$.

Збільшити абсолютні значення коренів характеристичного рівняння можна, наприклад, збільшуючи значення параметра T_2 фільтру. При цьому шумова смуга системи, що дорівнює

$$W_{L3\text{ПФ}} = \frac{r+1}{2T_1[1+T_1/(rT_2)]} = \frac{A_0 K(A_0 K+1)}{2[A_0 K+1/T_2]},$$

буде зменшуватися, відхиляючись від оптимального значення. Тому розімкнений зв'язок необхідно вибирати так, щоб компенсувати це відхилення.

Розкривши вираз (21), отримаємо вираз для приросту величини ΔW_L , таким чином:

$$\Delta W_L = \frac{1}{2(mA_0 K T_2 + 1)}(K_3 K_4)^2 + \frac{A_0 K}{(mA_0 K + 1/T_2)}(K_3 K_4). \quad (24)$$

З цього виразу видно, що при будь-якому скільки завгодно малому значенні параметра T_2 , при збільшенні параметра K_4 розімкненого зв'язку, можна отримати будь-який необхідний приріст шумової смуги [13]. Отже, збільшення абсолютного значення коренів характеристичного рівняння при збереженні оптимального значення дисперсії фазової помилки, обмежене лише фізично досяжним значенням параметра T_2 фільтру.

Якщо необхідно враховувати також доплерівський ефект ($d(t) \neq 0$), то методика розрахунку розімкненого зв'язку залишається без змін, тільки у формулу (3) в якості $G_s(\omega)$ необхідно підставити суму $G_s(\omega) = G_{\Delta\varphi} + G_d(\omega)$.

Доплерівський зсув на вході системи визначається функцією поліноміального типу [12]:

$$d(t) = \varphi_0 + \sum_{r=0}^{N-1} (\Omega_r t^{r+1}) (r+1) \quad (25)$$

Якщо прийняти, наприклад, у розрахунку доплерівського зсуву (25) $r=0$, отримаємо $G_d(\omega) = \varphi_0^2 / \omega^2 + \Omega_0^2 / \omega^4$. Таким чином, врахування складової $G_d(\omega)$ змінює лише оптимальне значення шумової смуги ЗСС КСС.

Висновки. В роботі розглянуте питання впливу фазової нестабільності генераторів в каналах зв'язку на мінімізацію дисперсії фазової помилки в ЗСС та КСС на фоні адитивного гаусівського шуму та доплерівського зміщення частоти.

Показано, що для ЗСС мінімізація дисперсії фазової помилки шляхом зменшення параметрів передавальних функцій складових ланок системи при фазової нестабільності генераторів погіршить якість перехідного процесу.

Збільшення шумової смуги пропускання пропорційно-інтегруючого фільтру вхідного сигналу ЗСС до параметрів ідеального фільтру погіршує динаміку вказаної системи.

Для КСС, в умовах фазової нестабільності генераторів, збільшення шумової смуги пропускання вхідного сигналу можна досягнути застосувавши в замкнутому контурі ПФ та здійсненні відповідного підбору параметрів передавальної функції ланки розімкненого каналу.

В умовах фазової нестабільності генераторів КСС шляхом підбором параметрів ПФ можна забезпечити необхідну динаміку системи та досягти збереження оптимального значення дисперсії фазової помилки в ній. Врахування доплерівського шуму в умовах фазової нестабільності генераторів для ЗСС та КСС вимагає зменшення оптимального значення шумової смуги пропускання.

Запропоновані в роботі аналітичні залежності дозволяють уточнити методику синтезу розімкненого зв'язку для КСС з врахуванням фазової нестабільності генераторів на фоні впливу адитивного гаусівського шуму та впливу доплерівського зміщення частоти.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Анализ систем синхронизации при наличии помех / Б.И. Шахтарин. М. : Горячая линия – Телеком, 2016. 360 с.
2. Габриэлян Д.Д., Енгибарян И.А., Сафарьян О.А. Новый метод стабилизации частоты генераторов / *REDS: телекоммуникационные устройства и системы*. 2014. Том. 4. №1. С.30-34.
3. Bhatti J., Noels N. and Moeneclaey M. Low-complexity frequency offset and phase noise estimation for burst-mode digital transmission in Proc / *IEEE PIMRC*, 11-14 September 2011, Toronto. pp.1662–1669.
4. Grosu F., Birzu A., Lazar A. and Grosu I. Coupling Systems for a New Type of Phase Synchronization / *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2016, 10 pages.
5. Бойко Ю. М. Оцінювання якісних показників пристроїв синхронізації сигналів засобів телекомунікацій / *Вісник Хмельницького національного університету*. 2015. № 1. С. 204-213.
6. Understanding Digital Signal Processing / Lyons R.G. Boston : Prentice Hall, 2010. 992 p.
7. Scheers B. and Nir V. A Modified Direct-Sequence Spread Spectrum Modulation Scheme for Burst Transmissions / *Military Communications and Information Systems Conference (MCC'2010)*, September 27–28, 2010. Wroclaw, Poland, P.366–3673.
8. Salim O., Nasir A., Mehrpouyan H., Xiang W., Durrani S. and Kennedy R. Channel, phase noise, and frequency offset in OFDM systems: Joint estimation, data detection, and hybrid cramer-rao lower bound / *IEEE Trans. Commun.* 2014, №62(9), pp. 3311–3325.
9. Бойко Ю. М., Єрсьоменко О. І. Аналіз моделей систем синхронізації у цифрових приймачах / *Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції. Одеська національна академія зв'язку ім. Попова*, 5–10 червня, 2015 р. Одеса, С. 192-194.
10. Кучер Д.Б., Макогон В.П. Відновлення несучої при когерентній демодуляції сигналу з безперервною фазою засобів зв'язку / *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2013. № 2(11). С. 148-149.
11. Сафарьян О. А. Метод оценки частоты генераторов в условиях непрогнозируемого изменения длительности интервала измерений / *Вестник ДГТУ*. 2014. Т. 14, № 4 (79). С.142-149.
12. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е издание.:Пер. с английского / Б.Скляр. М. :Издательский дом «Вильямс», 2003. 1099 с.
13. Помехоустойчивость приема спектрально-эффективных шумоподобных сигналов : монографія / В.Н. Бондаренко. Красноярск :Сибирский Федеральный Университет, 2015. 160 с.
14. The Art of Electronics : 3rd edition / P. Horowitz and W. Hill. Cambridge :Cambridge University Press, 2015, 1220 p.
15. Поликаровских А. И. Современные опорные генераторы для систем синтеза частот и сигналов / *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2014. Т. 10, № 4, С. 100-108.
16. Nasir A., Durrani S. and Kennedy R. Particle filters for joint timing and carrier estimation: Improved resampling guidelines and weighted bayesian cramer-rao bounds / *IEEE Trans. Commun.* 2012. №60(5). pp.1407–1419.

REFERENCES:

1. Shakhhtar B.I. (2016), “Analiz sistem sinkhronizatsii pri nalichii pomekh” [Analysis of synchronization systems in the presence of interference], Hotline – Telecom, Moscow. 360 p.
2. Gabrielyan D.D., Yengibaryan I.A. and Safaryan O.A. (2014), “Novyy metod stabilizatsii chastoty generatorov” [A New Method for Stabilizing Generator Frequency], REDS: Telecommunication Devices and Systems, Vol. 4, No. 1, pp.30-34.
3. Bhatti J., Noels N. and Moeneclaey M. (2011), “Low-complexity frequency offset and phase noise

estimation for burst-mode digital transmission in Proc”, IEEE PIMRC, 11-14 September 2011, Toronto. pp.1662–1669.

4. Grosu F., Birzu A., Lazar A. and Grosu I. (2016), “Coupling Systems for a New Type of Phase Synchronization”, Mathematical Problems in Engineering, Volume 1, 10 pages.

5. Boyko Y.M. (2015), “Otsinyuvannya yakisnykh pokaznykiv prystroyiv synkhronizatsiyi syhnaliv zasobiv telekomunikatsiy” [Estimation of quality indicators of telecommunication signal synchronization devices], News of the Khmelnytsky National University, No. 1, pp. 204-213.

6. Lyons R.G. (2010) “Understanding Digital Signal Processing”, Prentice Hall, Boston. 992 p.

7. Scheers B. and Nir V. A. (2010), “Modified Direct-Sequence Spread Spectrum Modulation Scheme for Burst Transmissions”, Military Communications and Information Systems Conference (MCC’2010), September 27–28, 2010, Wroclaw, Poland, pp.366-3673.

8. Salim O., Nasir A., Mehrpouyan H., Xiang W., Durrani S. and Kennedy R. (2014), “Channel, phase noise, and frequency offset in OFDM systems: Joint estimation, data detection, and hybrid cramer-rao lower bound”, IEEE Trans. Commun, №62(9), pp. 3311-3325.

9. Boyko Y.M. and Eremenko O.I. (2015), “Analiz modeley system synkhronizatsiyi u tsyfrovyykh pryymachakh” [Analysis of models of synchronization systems in digital receivers], Proceedings of the XIV International Scientific-Practical Conference National Academy of Communication, June 5-10 2015, Odessa, pp. 192-194.

10. Kucher D.B. and Makogon V.P. (2013), “Vidnovlennyya nesuchoyi pry koherentniy demodulyatsiyi syhnalu z bezpererвноyу fazoyu zasobiv zv’yazku” [Recovery of a carrier with coherent demodulation of a continuous phase signal of communications], Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, No. 2 (11), pp. 148-149.

11. Safaryan O.A. (2014), “Metod otsenki chastoty generatorov v usloviyakh neprognoziruемого izmeneniya dlitel'nosti intervala izmereniy ” [A method of estimating the frequency of generators in the conditions of unpredictable change in the duration of the measurement interval], DGTU Bulletin, Vol. 14, No. 4 (79). pp.142-149.

12. Sklyar B. (2003), “Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye” [Digital communication. Theoretical foundations and practical application], Williams Publishing House, Moscow, 1099 p.

13. Bondarenko V.N. (2015), “Pomekhoustoychivost' priyema spektral'no-effektivnykh shumopodobnykh signalov” [Immunity of reception of spectrally effective noise-like signals], monograph, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 160 p.

14. Horowitz P. and Hill W. (2015), “The Art of Electronics”, Cambridge University Press, Cambridge, 1220 p.

15. Polikarovskikh A.I. (2014), “ Sovremennyye opornyye generatory dlya sistem sinteza chastot i signalov” [Modern reference generators for frequency and signal synthesis systems], Bulletin of the Voronezh State Technical University, Vol. 10, No. 4. pp. 100-108.

16. Nasir A., Durrani S. and Kennedy R. (2012), “Particle filters for joint timing and carrier estimation: Improved resampling guidelines and weighted bayesian cramer-rao bounds”, IEEE Trans. Commun, №60(5), pp.1407–1419.

к.т.н., доц. Туровский О.Л., к.т.н., доц. Кирпач Л.А.

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ НЕСУЩИХ ЧАСТОТ НА ФОНЕ АДДИТИВНОЙ ГАУССОВСКОЙ ШУМА И ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЕ ЧАСТОТЫ

Предметом изучения в статье является системы фазовой синхронизации радиотехнических устройств техники связи. Целью статьи является теоретические исследования в направлении разработки, анализа и совершенствования известных и синтез новых схем фазовой синхронизации, характеризующихся высокой помехоустойчивостью, точностью и быстродействием при простоте конструкции. Задача, решаемая - исследовать возможности замкнутой и комбинированной систем синхронизации, о работе в условиях фазовой нестабильности генераторов в канале связи на фоне внешнего аддитивного гауссовского шума и доплеровского смещения частоты. Получены следующие результаты. Проведен анализ систем синхронизации замкнутого типа при работе в условиях фазовой нестабильности генераторов и показана ее несоответствие по минимизации дисперсии фазовой ошибки и повышение динамики

при слежении за несущей частотой. Проведено уточнение процесса синтеза разомкнутой связи в комбинированной системе синхронизации и предложены аналитические зависимости, позволяющие уточнить методику синтеза разомкнутой связи для комбинированной системы синхронизации с учетом фазовой нестабильности генераторов на фоне влияния аддитивного гауссовского шума и доплеровского смещения частоты. Выводы. Увеличение шумовой полосы пропускания пропорционально-интегрирующего фильтра входного сигнала системы фазовой синхронизации закрытого типа с параметрами идеального фильтра в условиях фазовой нестабильности генераторов ухудшает динамику указанной системы. Для комбинированной системы синхронизации, в условиях фазовой нестабильности генераторов, увеличение шумовой полосы пропускания входного сигнала можно достичь, применив в замкнутом контуре пропорционально-интегрирующий фильтр и осуществив соответствующий подбор параметров передаточной функции звена разомкнутого канала. В условиях фазовой нестабильности генераторов в комбинированной системе синхронизации путем подбора параметров пропорционально-интегрирующего фильтра можно обеспечить необходимую динамику системы и достичь сохранения оптимального значения дисперсии фазовой ошибки в ней. Учет доплеровского шума в условиях фазовой нестабильности генераторов для системы синхронизации замкнутого типа и комбинированной системы синхронизации требует уменьшения оптимального значения шумовой полосы пропускания.

Ключевые слова: синхронизация несущей частоты, система синхронизации замкнутого типа, комбинированная система синхронизации, фазовая нестабильности генератора, который подстраивается.

Ph.D. Turovsky O.L., Ph.D. Kirpach L.A.

EFFECT OF PHASE INSTABILITY OF GENERATORS ON THE OPERATING PARAMETERS OF A CARRIER FREQUENCY SYNCHRONIZATION SYSTEM AGAINST A BACKGROUND OF ADDITIVE GAUSSIAN NOISE AND A DOPPLER FREQUENCY SHIFT

The article deals with the systems of phase synchronization of radio engineering devices of communication technology. The purpose of the article is theoretical research in the direction of development, analysis and improvement of known and synthesis of new phase synchronization circuits, characterized by high noise immunity, accuracy and speed with simplicity of design. The problem is solved to investigate the possibilities of closed and combined synchronization systems for operation under conditions of phase instability of generators in a communication channel against the background of external additive Gaussian noise and Doppler frequency shift. The following results were obtained. The analysis of closed-type synchronization systems during operation under the conditions of phase instability of generators is carried out and its inconsistency is shown in order to minimize the phase error variance and increase the dynamics during carrier frequency monitoring. The process of synthesis of open communication in the combined synchronization system is refined and analytical dependences are offered, which allow to refine the technique of synthesis of open communication for the combined synchronization system with regard to the phase instability of the generators against the background of the influence of the adducts. Conclusions. Increasing the noise bandwidth of the proportional-integrating filter of the closed-loop phase-in-phase synchronization system to the parameters of the ideal filter impairs the dynamics of the specified system. For the combined synchronization system, in the conditions of phase instability of the generators, an increase in the noise bandwidth of the input signal can be achieved by applying a closed-loop proportional-integrating filter and by making appropriate selection of parameters of the transfer function of the link of the open channel. In the conditions of phase instability of the generators in the combined system of synchronization by selecting the parameters of the proportional-integrating filter, it is possible to provide the necessary dynamics of the system and to achieve the optimal value of the dispersion of the phase error in it. Taking into account Doppler noise under conditions of phase instability of generators for a closed-type synchronization system and a combined synchronization system requires a reduction of the optimal value of the noise bandwidth.

Keywords. carrier frequency synchronization, closed-type synchronization system, combined synchronization system, phase instability of the adjustable generator.