

УДК 621.396

DOI: 10.31673/2412-9070.2022.025561

В. І. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент;
М. Ю. НЕВГОД, аспірант;
А. Г. ЗАХАРЖЕВСЬКИЙ, канд. техн. наук,
Державний університет телекомунікацій, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕГАТИВНИХ ВНУТРІШНІХ ФАКТОРІВ НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ КОГЕРЕНТНОГО ДЕМОДУЛЯТОРА СУПУТНИКОВОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ В СТАЛИХ ТА ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ ОЦІНЮВАННЯ НОСІЙНОЇ ЧАСТОТИ

Предметом вивчення в статті є системи фазової синхронізації радіотехнічних пристроїв техніки зв'язку. Метою статті є теоретичні дослідження в напрямку розроблення, аналізу та вдосконалення відомих і синтез нових схем фазової синхронізації, що характеризуються високою завадостійкістю, точністю і швидкодією з простотою конструкції. Задача, що розв'язується — дослідити можливості замкненої та комбінованої систем синхронізації щодо роботи за умов шумів та збурень внутрішнього характеру на фоні зовнішнього адитивного гауссівського шуму та доплерівського зміщення частоти. Подано модель, яка дає змогу дослідити вплив негативних внутрішніх факторів на показники роботи системи синхронізації когерентного демодулятора супутникової телекомунікації в сталих та перехідних режимах оцінювання носійної частоти. За її допомогою здійснено аналіз систем синхронізації замкненого типу під час роботи за умов впливів негативних внутрішніх факторів та показано її невідповідність щодо мінімізації дисперсії фазової помилки і підвищення динаміки під час стеження за носійною частотою. Проведено уточнення процесу синтезу розімкненого зв'язку в комбінованій системі синхронізації та запропоновано аналітичні залежності, які уможливають уточнення методики синтезу розімкненого зв'язку для комбінованої системи синхронізації з врахуванням впливу внутрішніх негативних факторів. Установлено, що за умов впливу негативних внутрішніх факторів для комбінованої системи синхронізації через добирання параметрів пропорційно-інтегровального фільтра можна досягти розширення шумової смуги пропускання вхідного сигналу і цим забезпечити необхідну динаміку системи та досягти збереження оптимального значення дисперсії фазової помилки в ній.

Ключові слова: синхронізація носійної частоти; система синхронізації замкненого типу; комбінована система синхронізації; фактори внутрішнього негативного впливу.

Вступ

У різні радіотехнічні пристрої техніки зв'язку, радіолокації і керування, а також у пристрої точного магнітного запису широко впроваджено системи фазової синхронізації. Зокрема, у фазокогерентних системах супутникових телекомунікації і керування вони застосовуються для відновлення носійної і тактової частот та для когерентної демодуляції аналогових і цифрових сигналів із кутовою модуляцією [1].

Робота систем синхронізації когерентних демодуляторів характеризується впливом низки зовнішніх збурень та шумів на їхню роботу, а саме: адитивного флуктуаційного шуму, збурення корисної кутової модуляції (у разі фільтрації носійної частоти), стрибків фази і частоти тощо. У лініях космічного зв'язку, наприклад, основними зовнішніми збуреннями є адитивний гауссівський шум і доплерівські зміщення частоти [1; 2].

Поряд із зовнішнім впливом на якість роботи системи фазової синхронізації можуть чинити і внутрішні завади та збурення різного характеру, які по суті формують певний перелік негативних внутрішніх факторів [1; 2].

Варто зазначити, що для ефективної роботи системи синхронізації потрібно безпосередньо забезпечити високу точність її функціонування як у сталому, так і перехідному режимах стеження за носійною частотою [1]. Тобто перехідний режим та пов'язаний із ним очевидний вплив на фазову помилку можна віднести теж до внутрішніх негативних факторів [2].

Системи синхронізації, що працюють за умов впливу різних шумів та збурень внутрішнього та зовнішнього негативного характеру, мають характеризуватися малою дисперсією фазової помилки і високою швидкодією. Це впливає з їх ролі та призначення згідно з функціональною структурою тракту приймання вхідного сигналу когерентним демодулятором у сталих та перехідних режимах стеження за носійною частотою.

Проведення наукових досліджень та науково-технічна робота в напрямку розроблення нових та вдосконалення наявних систем синхронізації потребує попередньої формалізації переліку внутрішніх негативних факторів та окремого моделювання впливу зазначених факторів на показники роботи системи синхронізації когерентного демодулятора.

© В. І. Кравченко, М. Ю. Невгод, А. Г. Захаржевський, 2022

Як такі фактори зазвичай беруться точність оцінювання носійної частоти (пов'язана з мінімізацією фазової помилки) та швидкодія системи синхронізації на етапі оцінювання носійної частоти вхідного сигналу. Важливим є підтримання необхідних значень як у сталому, так і в перехідному режимах стеження за носійною частотою.

Отже, моделювання впливу негативних внутрішніх факторів на точність оцінювання носійної частоти і швидкодію системи синхронізації когерентного демодулятора супутникової телекомунікації в сталих та перехідних режимах стеження за носійною частотою є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх публікацій та постановка проблеми. Питанню аналізу відомих та розроблення нових схем систем фазової синхронізації супутникових телекомунікацій, беручи до уваги мінімізацію впливу різних внутрішніх завод та збурень на показники їх роботи, розглядалися у низці наукових праць.

У статті [3] подано алгоритм оцінювання фазового шуму на основі застосування розрахункових коефіцієнтів розрізненого дискретно-косинусного перетворення та запропоновано низку реалізацій такого алгоритму. Алгоритм враховує як зміщення носійної частоти, так і фазовий шум, але не зважає на оцінювання впливу внутрішніх факторів на показники роботи системи синхронізації.

У [4] розглянуто результати дослідження комбінованої системи синхронізації (КСС) із розімкненим зв'язком за умови впливу зовнішніх збурень. Зауважено, що на протипагу простим КСС, перспективна комбінована система автоматичного регулювання, в якій пропонується синтез розімкненого зв'язку за умови підвищення порядку астатизму має свої особливості, зумовлені специфічними вхідними вузлами замкненого і розімкненого каналів керування. У цій статті відсутній перелік можливих внутрішніх негативних факторів та оцінювання їх впливу на показники роботи зазначеного типу системи синхронізації.

У працях [5–7] досліджено оптимізацію параметрів фазового фільтра і системи синхронізації в цілому для класу замкнених систем синхронізації (ЗСС). Подані результати показали, що ЗСС через властивість їм протиріччя іноді не дають змоги забезпечити необхідну якість роботи. Це особливо відчутно, коли потрібно поліпшити якість системи за двома і більше суперечливими показниками. Перелік можливих негативних внутрішніх факторів, що впливають на процес підвищення якості роботи та моделювання характеру їх впливу, тут відсутній.

Великі можливості щодо підвищення значень показників роботи систем синхронізації в класі типу КСС описано в [1; 8]. У цих працях безпосередньо показано, що найбільш перспективним напрямком такого вдосконалення є поєднання принципів регулювання за відхиленням і збуренням. У статті [8] визначено важливість оцінювання впливу такого фактора, як нестабільність генераторів, але безпосередньо в ній та в праці [1] моделювання характеру та оцінювання такого впливу відсутні.

У таких статтях, як [9; 10], загалом проводиться аналіз швидкодії роботи КСС під час простого розімкненого 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 [11] зазначено, що вплив внутрішніх негативних факторів може бути істотним. Їх врахування та мінімізація може бути одним із напрямків підвищення ефективності роботи системи фазової синхронізації. Проте сама модель впливу та оцінювання такої дії в роботі відсутні.

Статтю [12] безпосередньо присвячено питанням оцінювання впливу фазової нестабільності генераторів на мінімізацію фазової помилки системи синхронізації когерентного демодулятора супутникової телекомунікації. Однак питання обрисів всіх збурень та завод внутрішнього характеру, що можуть негативно вплинути на параметри роботи систем синхронізації зазначеного типу, в цій роботі не розглядалися.

Отже, дослідження щодо формалізації переліку та моделювання характеру впливу негативних внутрішніх факторів на точність оцінювання носійної частоти і швидкодію системи синхронізації когерентного демодулятора супутникової телекомунікації є актуальним науковим завданням.

Основна частина

Питання підвищення якості функціонування системи фазової синхронізації — це постійні важливі наукові завдання, котрі можуть бути розв'язані методом створення відповідних оптимальних схем її побудови в напрямку мінімізації дисперсії фазової помилки з одночасним забезпеченням високої швидкодії. Очевидно, що зазначені схеми вирішують питання мінімізації фазової помилки через створення науково обґрунтованих оптимальних схем побудови, які функціонують на основі розроблених математичних моделей. Такі математичні моделі, зі своєю боку, мають брати до уваги параметри всіх функціональних складових ланок і елементів розглядуваної схеми системи синхронізації.

Кінцевим етапом розроблення та впровадження таких математичних моделей у технічні рішення та побудованих на їх основі схем синхронізації є розв'язання низки завдань, а саме:

- оцінювання граничних можливостей зазначених схем щодо мінімізації дисперсії фазової помилки;
- добирання та обґрунтування параметрів складових елементів і функціональних ланок схеми побудови систем синхронізації в напрямку мінімізації дисперсії фазової помилки в процесі стеження за носійною частотою.

Очевидним є вирішення останнього завдання з огляду на такі шуми та збурення, що мають характер внутрішнього негативного впливу і безпосередньо залежать як від схеми побудови системи синхронізації, так і від характеристик її функціональної бази.

До таких шумів та збурень, які визначимо як негативні внутрішні фактори, належать [1–5]:

- вплив фазової нестабільності опорних генераторів комбінованої системи синхронізації на дисперсію фазової помилки;
- обмеження, що формуються впливом випадкового вхідного сигналу на процес мінімізації фазової помилки комбінованої системи синхронізації;
- відхилення параметрів каналів оброблення вхідного сигналу на фазову помилку комбінованої системи синхронізації;
- наявність перехідної складової фазової помилки.

Перейдемо до розроблення моделі побудови системи синхронізації, зважаючи на фактори негативно-го внутрішнього впливу.

Загалом фазова модуляція сигналу містить такі складові [1; 2]:

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

де $d(t)$ — доплерівський зсув на вході; $M(t)$ — корисна кутова модуляція; $\Delta\psi(t)$ — внутрішні шуми та збурення.

Під час когерентного приймання потрібне точне знання поточної фази носійного коливання. У разі використання системи синхронізації як фільтра фази вхідним сигналом є відповідно до виразу (1) сума $d(t) + \Delta\psi(t)$, де $\Delta\psi(t) = \psi_1(t) - \psi_2(t)$, $\psi_2(t)$ — внутрішні шуми та збурення. Процеси $M(t)$ і $N(t)$ у цьому разі є завадою.

Отже, дисперсія фазової помилки складається з чотирьох компонентів [13; 14]:

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

кожний з яких відповідно до спектральної теорії визначається в такий спосіб:

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

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

де $W(S) = 1 - W_{\varphi}(S)$.

Для цього випадку $G_S(\omega) = G_d(\omega) + G_{\Delta K}(\omega)$, $G_n(\omega) = G_M(\omega) + G_N(\omega)$.

Передатна функція за помилкою ЗСС обчислюється за виразом (5) [4; 15]:

$$W(S) = \frac{1}{1 + W_1(S)W_2(S)W_3(S)} = \frac{T_2(S+1)S}{a_0S^2 + a_1S + a_2} = \frac{D_{\varphi 30}(S)S^{v_3}}{F_3(S)}, \quad (5)$$

тобто передатна функція $W_3(S)$ набере вигляду

$$W_3(S) = \lfloor W_1(S)W_2(S)W_3(S) \rfloor / \lfloor 1 + W_1(S)W_2(S)W_3(S) \rfloor. \quad (6)$$

З виразів (5), (6) випливає, що мінімізувати дисперсію σ_{φ}^2 можна лише відповідним добиранням параметрів ланок $W_1(S) - W_3(S)$. Оскільки ці параметри входять у характеристичне рівняння ЗСС $F_3(S) = 0$, то зміна їх задля зменшення дисперсії фазової помилки погіршить якість перехідного процесу в системі ЗСС [3].

Визначимо можливості мінімізації дисперсії фазової помилки в КСС і методику синтезу розімкнено-го зв'язку з умови $\min \sigma_{\varphi}^2$.

Відповідно до передатної функції за помилкою КСС з виразу (5) дістанемо [4; 15]:

$$W_K(S) = \frac{[D_1(S)D_2(S)F_4(S) + F_1(S)F_2(S)D_4(S)]D_3(S)}{[F_1(S)F_2(S)F_4(S) + D_1(S)D_2(S)D_3(S)]F_4(S)} = \frac{D_K(S)}{F_K(S)}, \quad (7)$$

де $F_K(S) = F_3(S) \times F_4(S)$.

Оскільки в чисельники передатних функцій КСС, заданих виразами (5), (7), входять поліноми $F_4(S)$, $D_4(S)$ додаткової розімкненої ланки, то через відповідний добір їх параметрів можна також мінімізувати дисперсію фазової помилки. Взявши до уваги, що поліном $F_4(S)$ входить у характеристичне рівняння КСС як співмножник, корені, котрі вносяться ним, можна вибрати так, аби вони не впливали на перехідний процес початкової системи. Якщо вимагати, щоб виконувалась умова:

$$F_4(S) = F_1(S)F_2(S), \tag{8}$$

то передатні функції КСС за помилкою і за вихідним сигналом наберуть вигляду відповідно:

$$W_{\phi K}(S) = \frac{F_1(S)F_4(S) + D_3(S)D_4(S)}{F_1(S)F_2(S)F_3(S) + D_1(S)D_2(S)D_3(S)} = \frac{D_{\phi K}(S)}{F_3(S)}, \tag{9}$$

$$W_K(S) = \frac{[D_1(S)D_2(S) + D_4(S)]D_3(S)}{F_1(S)F_2(S)F_3(S) + D_1(S)D_2(S)D_3(S)} = \frac{D_K(S)}{F_3(S)}. \tag{10}$$

У цьому разі 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 $\min \sigma_{\phi}^2$.

Розглянемо випадок стеження за носійною 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 варто розглянути спектри

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

Як відомо [2; 16], енергетичний спектр шумів та збурень у радіотехнічній системі можна подати так:

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

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

Отже, вираз для дисперсії фазової помилки в ЗСС набере такого вигляду [14]:

$$\sigma_{\phi 3}^2 = \sigma_{\Delta\psi}^2 + \sigma_N^2 = \frac{r+1}{4r} \frac{N_T}{W_{L3}} + G(r) \frac{N_f}{W_{L3}^2} + \frac{N_0 W_{L3}}{2A_0^2}, \tag{13}$$

де $r = (A_0 K T_1^2)/T_2$; $W_{L3\Pi\Phi}$ — двостороння шумова смуга пропорційно-інтегровального фільтра (ПФ), $W_{L3\Pi\Phi} = (r+1)/\lfloor 2T_1(1+T_1/rT_2) \rfloor$; $G(r) \approx 1,5$.

З цього виразу видно, що зміна шумової смуги по-різному впливає на дисперсію фазової помилки, спричинену внутрішніми шумами та збуреннями, а також адитивним шумом.

Взявши похідну за W_{L3} і прирівнявши її до нуля, визначимо W_{L3OPT} , аналіз якого показує, що мінімум дисперсії фазової помилки дістанемо в разі введення в замкнений контур ідеального фільтра (ІФ) замість ПФ, що, як було показано в [3], погіршує динаміку системи ЗСС.

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

Уведення в ЗСС ІФ замість ПФ дещо розширює шумову смугу системи [3]. Дійсно, $W_{L3I\Phi} \approx (r+1)/(2T_1)$ і $W_{L3I\Phi}/W_{L3\Pi\Phi} = 1 + T_1/(rT_2) \geq 1$.

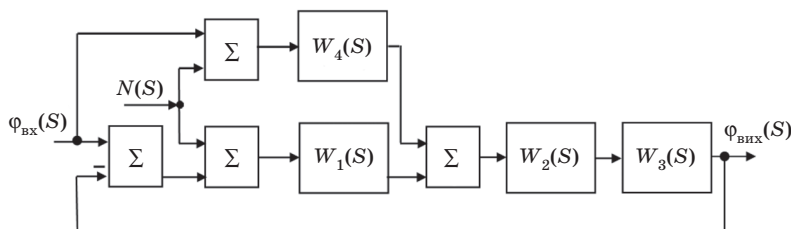
Таке саме збільшення шумової смуги можна здобути й при ПФ у замкнутому контурі відповідним добиранням параметрів розімкненого каналу.

Визначимо вид і параметри ланки $W_4(S)$ розімкненого зв'язку, що дає змогу дістати КСС з такою самою смугою, як ЗСС з ІФ, але при ПФ у замкнутому контурі, параметри якого можуть бути вибрані з умови забезпечення потрібної якості динаміки системи. Інакше кажучи, будемо синтезувати розімкнений зв'язок з умови

$$W_{LK} = W_{L3I\Phi}, \tag{14}$$

що дасть можливість оптимізувати систему за мінімумом дисперсії фазової помилки без погіршення динаміки.

Структурну схему лінійної моделі КСС із додатковою ланкою, взяту для дослідження, зображено на рисунку.



Структурна схема лінійної моделі комбінованої системи синхронізації з додатковою ланкою

Тут $W_1(S)$, $W_2(S)$, $W_3(S)$ — передатна функція відповідно фазового дискримінатора (ФД), фільтра (Ф), узагальненого образу джерела внутрішніх шумів та збурень (ПГ), які мають такий вигляд [4]:

$$W_1(S) = K_1 + (D_1(S)/F_1(S)) \quad W_3(S) = K_3/S = D_3(S)/F_3(S), \quad (15)$$

де K_1 — коефіцієнт підсилення ПГ, $K_1 = A_1 K_{\text{ФД}}$; S — оператор Лапласа.

Передатну функцію $W_2(S)$ [14] систем синхронізації з ПДФ у замкненому контурі можна подати так:

$$W_2(S) = (T_1 S + 1)/(T_2 S + 1). \quad (16)$$

Передатна функція $W_4(S)$ розімкненого зв'язку, що задовольняє умову і забезпечує $v_k = 1$, має такий загальний вигляд [4; 14]:

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

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

Якщо у формули (9), (10) підставити вирази для передатних функцій ланок системи (див. рисунок) з (15), (16) і (17) при $n = 1$, то дістанемо:

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

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

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

Двосторонню шумову смугу КСС із ПДФ у замкненому контурі можна подати так [16]:

$$W_{LK} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_K(j\omega)|^2 d\omega = W_{L3\text{ПДФ}} + \Delta W_L, \quad (20)$$

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

де $\beta = T_1/(rT_2)$.

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

$$\Delta W_L = \Delta W_{L3\text{ІФ}} - \Delta W_{L3\text{ПДФ}} = \beta(r + 1)/[2T_1(1 + \beta)]. \quad (22)$$

Порівнявши вирази (21) і (22), дістанемо таке рівняння:

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

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

Якщо розв'язати рівняння (23), здобудемо значення параметра K_4 , при якому забезпечується оптимальна передатна функція КСС з умови $\min \sigma_{\text{Ф}}^2$ за необхідної якості динаміки системи.

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

Збільшити абсолютні значення коренів характеристичного рівняння можна, наприклад, нарощуючи значення параметра T_2 фільтра. При цьому шумова смуга системи, яка дорівнює

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

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

Розкривши рівність (21), дістанемо вираз для приросту ΔW_L :

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

З цього виразу випливає, що за будь-якого скільки завгодно малого значення параметра T_2 , зі збільшенням параметра K_4 розімкненого зв'язку можна дістати будь-який необхідний приріст шумової смуги [13]. Отже, збільшення абсолютного значення коренів характеристичного рівняння зі збереженням оптимального значення дисперсії фазової помилки обмежене лише фізично досяжним значенням параметра T_2 фільтра.

Якщо потрібно брати до уваги також і доплерівський ефект ($d(t) \neq 0$), то методика розрахунку розімкненого зв'язку залишається без змін, тільки у формулу (3) як $G_S(\omega)$ маємо підставити суму $G_S(\omega) = G_{\Delta\text{Ф}}(\omega) + G_d(\omega)$.

Доплерівський зсув на вході системи визначається функцією поліноміального типу [13; 16; 17]:

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

Якщо взяти, наприклад, у розрахунок доплерівського зсуву (25) $r = 0$, то дістанемо $G_d(\omega) = \varphi_0^2 / \omega^2 + \Omega_0^2 / \omega^4$. Таким чином, урахування складової $G_d(\omega)$ змінює лише оптимальне значення шумової смуги в ЗСС і КСС.

Висновки

У статті розглянуто питання впливу негативних внутрішніх факторів у каналах приймання вхідного сигналу на мінімізацію дисперсії фазової помилки в ЗСС та КСС на фоні адитивного гауссівського шуму та доплерівського зміщення частоти.

Показано, що для ЗСС мінімізація дисперсії фазової помилки зменшенням параметрів передатних функцій складових ланок системи за умови впливу негативних внутрішніх факторів погіршить якість перехідного процесу.

Збільшення шумової смуги пропускання пропорційно-інтегрувального фільтра вхідного сигналу ЗСС до параметрів ідеального фільтра погіршує динаміку зазначеної системи.

Для КСС за умови впливу негативних внутрішніх факторів збільшення шумової смуги пропускання вхідного сигналу можна досягнути, застосувавши в замкненому контурі ППФ та здійснивши відповідний добір параметрів передатної функції ланки розімкненого каналу.

За умов впливу негативних внутрішніх факторів КСС через добирання параметрів ППФ можна забезпечити потрібну динаміку системи та досягти збереження оптимального значення дисперсії фазової помилки в ній.

Урахування доплерівського шуму за умови впливу негативних внутрішніх факторів для ЗСС та КСС потребує зменшення оптимального значення шумової смуги пропускання.

Запропоновані аналітичні залежності дають змогу уточнити методикку синтезу розімкненого зв'язку для КСС, беручи до уваги фазову нестабільність генераторів на фоні впливу адитивного гауссівського шуму та впливу доплерівського зміщення частоти.

Список використаної літератури

1. **Шахтарин Б. И.** *Анализ систем синхронизации при наличии помех*. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 360 с.
2. **Designing a system to synchronize the input signal in a telecommunication network under the condition for reducing a transitional component of the phase error** / L. Berkman, O. Tkachenko, O. Turovsky [et al.] // *European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 1(109). P. 66–76. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225514>
3. **Bhatti J., Noels N., Moeneclaey M.** *Low-complexity frequency offset and phase noise estimation for burst-mode digital transmission in Proc // IEEE PIMRC, Toronto, 2011, 11-14 September*. P. 1662–1669.
4. **Coupling Systems for a New Type of Phase Synchronization** / F. Grosu, A. Birzu, A. Lazar, I. Grosu // *Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2016. 10 p.
5. **Бойко Ю. М.** *Оцінювання якісних показників пристроїв синхронізації сигналів засобів телекомунікацій* // *Вісник Хмельн. нац. ун-ту*. 2015. № 1. С. 204–213.
6. **Lyons R. G.** *Understanding Digital Signal Processing*. Boston: Prentice Hall, 2010. 992 p.
7. **Scheers B., 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. **Channel, phase noise, and frequency offset in OFDM systems: Joint estimation, data detection, and hybrid crammerao lower bound** / O. Salim, A. Nasir, H. Mehrpouyan [et al.] // *IEEE Trans. Commun.* 2014. №62(9). P. 3311–3325.
9. **Бойко Ю. М., Єрмоленко О. І.** *Аналіз моделей систем синхронізації у цифрових приймачах: матеріали XIV міжнар. наук.-практ. конф. Одес. нац. академія зв'язку ім. Попова. Одеса, 5-10 червня, 2015*. С. 192–194.
10. **Кучер Д. Б., Макогон В. П.** *Відновлення носійної 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. Туровський О. Л., Курнач Л. А. Вплив фазової нестабільності генераторів на параметри роботи системи синхронізації носійної частоти на фоні адитивного гауссівського шуму та доплерівського зміщення частоти // Зб. наук. праць ВІКНУ. 2020. №67. С. 62–71.

13. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е издание / пер. с англ. М.:Издательский дом «Вильямс», 2003. 1099 с.

13 Туровський О. Л., Беркман Л. Н., Захаржевський А. Г. Інваріантний підхід до зменшення сталих динамічних похибок фазових систем синхронізації в режимі відстежування носійної частоти // Зв'язок. 2020. №1(143). С. 44–50.

14. Horowitz P., Hill W. *The Art of Electronics: 3rd edition* / Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 1220 p.

15. Поликарровских А. И. Современные опорные генераторы для систем синтеза частот и сигналов / Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. 2014. Т. 10, № 4. С. 100–108.

16. Nasir A., Durrani S., 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). P. 1407–1419.

17. Consideration of limitations, which are formed by the input signal, on the phase error minimization process during carrier frequency tracking system of synchronization of radio technical device of communication / O. Turovsky, V. Kozlovskiy, Y. Balanyuk [et al.] // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 2020. Vol. 9. No 5, P. 8922–8928. URL:

<https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/290952020>. (Scopus, Q3 – 2018).

V. Kravchenko, M. Nevhod, A. Zakharzhevskiy

SIMULATION OF THE INFLUENCE OF NEGATIVE INTERNAL FACTORS ON PERFORMANCE INDICATORS OF THE SYNCHRONIZATION SYSTEM OF A COHERENT DEMODULATOR OF SATELLITE TELECOMMUNICATIONS IN PERMANENT AND TRANSIENT MODES OF CARRIER FREQUENCY ESTIMATION

The subject of study in the article is the system of phase synchronization of radio technical 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 schemes, which are characterized by high interference resistance, accuracy and speed of operation with a simple design. The problem to be solved is to investigate the possibilities of closed and combined synchronization systems in terms of operation in conditions of internal noise and disturbances against the background of external additive Gaussian noise and Doppler frequency shift. The article presents a model that allows you to investigate the influence of negative internal factors on the performance indicators of the synchronization system of the coherent demodulator of satellite telecommunications in stable and transient modes of carrier frequency estimation. With its help, the article analyzes closed-type synchronization systems when operating under the influence of negative internal factors and shows its inconsistency in minimizing the dispersion of the phase error and increasing the dynamics during tracking of the carrier frequency. The process of synthesis of open communication in the combined synchronization system has been clarified and analytical dependencies have been proposed, which allow to clarify the methodology of synthesis of open communication for the combined synchronization system, taking into account the influence of internal negative factors. It was established that under the influence of negative internal factors for the combined synchronization system, by selecting the parameters of the proportional-integrating filter, it is possible to achieve an expansion of the noise bandwidth of the input signal and thereby ensure the necessary dynamics of the system and achieve the preservation of the optimal value of the dispersion of the phase error in it.

Keywords: carrier frequency synchronization; closed-type synchronization system; combined synchronization system; factors of internal negative influence.