

В. В. КОЗЛОВСЬКИЙ  
Національний авіаційний університет  
О. Л. ТУРОВСЬКИЙ  
Державний університет телекомунікацій

## СИНТЕЗ СКЛАДНОГО РОЗІМКНУТОГО ЗВ'ЯЗКУ В СИСТЕМІ СИНХРОНІЗАЦІЇ ПРИ УМОВІ МІНІМІЗАЦІЇ ДИСПЕРСІЇ ФАЗОВОЇ ПОМИЛКИ В ХОДІ СТЕЖЕННЯ ЗА НЕСУЧОЮ ЧАСТОТОЮ

У роботі розглянуті питання підвищення ефективності функціонування комбінованої системи синхронізації шляхом синтезу складного розімкнутого зв'язку в напрямку мінімізації дисперсії фазової помилки при умові підтримання високого рівня динаміки роботи системи. Розроблені та подані в роботі математичні залежності, дозволяють провести синтез складного розімкнутого каналу в комбінованій системі синхронізації системи при умові мінімізації дисперсії фазової помилки, що включає в себе дві ланки частотних дискримінаторів. Завдяки проведеній в роботі оцінці впливу параметрів складної ланки розімкнутого зв'язку на мінімізацію дисперсії фазової помилки комбінованої системи синхронізації від рівня сигналу адитивного гаусівського шуму було показано, що: величина дисперсії помилки для комбінованої системи синхронізації значно менша, ніж для замкнутої системи синхронізації (ЗСС) при будь-якому виборі параметрів останньої; швидкодія системи в оптимальному мінімумі дисперсії фазової помилки КСС, мінімізованої по перехідній помилці значно вище, чим для ЗСС при аперіодичному характері перехідного процесу; при застосуванні в якості простого розірваного зв'язку схеми з послідовних ланок частотних дискримінаторів, включених в схему комбінованої системи синхронізації паралельно, мінімальна дисперсія фазової помилки при рості рівня шуму до певної критичної межі має обмеження, а розірваний зв'язок втрачає свою ефективність. Завдання мінімізації фазової помилки при додержанні умови підтримання та збільшення динаміки системи синхронізації може бути вирішене шляхом синтезу більш складних розімкнутих зв'язків, що можуть бути фізично реалізовані.

Ключові слова: синхронізація несучої частоти, комбінована система синхронізації, дисперсія фазової помилки, адитивний гаусівський шум.

V. KOZLOVSKY  
National Aviation University  
O. TUROVSKY  
State University of Telecommunications

## SYNTHESIS OF A COMPLEX INTERCONNECTED RELATIONSHIP IN THE SYNCHRONIZATION SYSTEM UNDER THE MINIMIZATION OF PHASE ERROR DISPERSION DURING DISCONTINUATION

The solution to the problem of improving the efficiency of space communication systems directly depends on the quality of operation under the influence of perturbations and noise of individual systems and devices that are part of them. One of the key communication systems, the operation of which significantly affects the efficiency of the input signal, is the synchronization system in the mode of monitoring the carrier frequency. The paper directly considers the issues of increasing the efficiency of the combined synchronization system by synthesizing a complex open connection in the direction of minimizing the variance of the phase error under the conditions of maintaining a high level of system dynamics. The mathematical dependences developed and presented in the work allow to carry out the synthesis of the proposed variant of a complex open connection that includes two links connected in series in a combined system synchronization system, provided that the phase error variance is minimized. Due to the evaluation of the influence of the parameters of the complex link of open communication on the minimization of the phase error dispersion of the combined synchronization system from the signal level of the additive Gaussian noise, it was shown that: the error variance value for the combined synchronization system is much smaller than what choice of parameters of the last; the speed of the system in the optimal minimum of the variance of the phase error of the KSS, minimized by the transient error is much higher than for the SSS with the aperiodic nature of the transient process; when using as a simple broken link a circuit of successive frequency discriminators included in the circuit of the combined synchronization system in parallel, the minimum dispersion of the phase error when the noise level rises to a certain critical limit is limited, and this broken link loses its effectiveness. The problem of minimizing the phase error while maintaining the condition of maintaining and increasing the dynamics of the synchronization system can be solved by synthesizing more complex open connections that can be physically realized.

Keywords: carrier frequency synchronization, combined synchronization system, phase error variance, additive Gaussian noise.

**Вступ.** Успішне вирішення завдання підвищення ефективності систем космічного зв'язку багато в чому залежить від якості функціонування в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх збурень і шумів окремих систем і пристроїв, що входять до їх складу. Відомо, що в лініях космічного зв'язку основними зовнішніми збуреннями є адитивний гаусівський шум і доплерівські зміщення частоти [1].

В якості однієї з основних систем, що входить до складу різних радіотехнічних пристроїв техніки космічного зв'язку, радіолокації та управління, широко впроваджена система фазової синхронізації. В фазокогерентних системах телекомунікації та управління такі системи застосовуються для відновлення несучої та тактової частот і для когерентної демодуляції аналогових і цифрових сигналів з кутовою модуляцією [2].

**Постановка задачі.** Питання підвищення якості функціонування комбінованої системи фазової синхронізації (КСС) є постійними важливими науковими завданнями і в ряді досліджень вирішуються методом створення відповідних оптимальних схем її побудови в напрямку мінімізації дисперсії фазової помилки та одночасно, забезпечення високої швидкодії. Очевидно, що вказані схеми вирішують питання

мінімізації фазової помилки через розробку науково обґрунтованих оптимальних схем побудови, які функціонують на основі розроблених математичних моделей. Вказані математичні моделі, в свою чергу, повинні враховувати параметри всіх функціональних складових ланок і елементів вказаної схеми системи синхронізації.

Кінцевим етапом розробки та впровадження таких математичних моделей в технічні рішення та побудованих на їх основі схем синхронізації є вирішення ряду завдань, а саме:

– розробка науково обґрунтованих схем синхронізації систем зв'язку в напрямку мінімізації дисперсії фазової помилки при забезпеченні високої швидкодії системи.

– оцінка граничних можливостей запропонованих схем щодо мінімізації дисперсії фазової помилки при умові дотримання заданого рівня швидкодії системи синхронізації.

В свою чергу, розробка різних варіантів таких схем розімкнутого зв'язку систем синхронізації несучої частоти та оцінка їх можливостей щодо мінімізації дисперсії фазової помилки є окремою науковою задачею, вирішення якої обумовлює актуальність досліджень, що пропонуються до розв'язання в даній роботі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанню побудови схем синхронізації та оцінці їх можливостей щодо мінімізації дисперсії фазової помилки присвячено ряд робіт.

В роботі [3] подано результати досліджень щодо аналізу та формалізації опису пристроїв синхронізації таких, які керуються рішенням і таких, які не керуються рішенням. Наведено залежності для дисперсії максимальної правдоподібної оцінки пристрою синхронізації від відношення сигнал/шум, які розроблено для системи без зворотного зв'язку за рішенням. Подані в даній роботі залежності дисперсії максимальної правдоподібної оцінки пристрою синхронізації від відношення сигнал/шум та залежності відхилення помилки синхронізації від відношення сигнал/шум на виході фазового детектору розроблені саме для схеми без зворотного зв'язку. Така схема по суті представляє замкнуту систему синхронізації (ЗСС), а подані в роботі залежності не дозволяють оцінити саме системи з складним розімкнутим зв'язком, які відносяться до іншого класу систем синхронізації.

В роботах [4, 5] описані дослідження, спрямовані в основному на оптимізацію параметрів фільтра та системи в цілому для класу замкнутих систем синхронізації. Однак ЗСС через властиві їм протиріччя не дозволяють в ряді випадків забезпечити необхідну якість роботи. Це особливо відчутно, коли потрібно поліпшити якість системи по двом і більше суперечливим показникам, що показали результати досліджень, подані в роботах [6, 7].

Великі можливості щодо поліпшення якості систем синхронізації є в класі комбінованих систем синхронізації (КСС). Вказані системи можуть поєднувати принципи регулювання по відхиленню та збуренню з одночасним забезпеченням мінімізації дисперсії фазової помилки, що визначалось в якості перспективних методів побудови КСС та висвітлено в роботах [6, 8].

У роботі [9] показано особливості реалізації системи відновлення несучої частоти при когерентній демодуляції сигналу з безперервною фазою. Подана в роботі схема побудови такої системи фазового автопідстроювання частоти по суті є комбінованою системою синхронізації з зворотнім зв'язком. В роботі досліджується питання практичної реалізації вказаної системи на сучасній елементній базі. Але дослідження відносно можливостей розроблених методів та поданої схеми побудови системи синхронізації щодо підвищення астатизму, зменшення дисперсії фазової помилки при стеженні за несучою частотою та оцінки запропонованих методів зменшення дисперсії в даній роботі відсутні.

Автори роботи [10] запропонували метод здійснення в КСС певного типу синхронізації послідовності сигналів, що розширюється в умовах значного перевищення рівня шуму над рівнем інформаційного сигналу. Для синхронізації використовується службовий канал, який працює на одній частоті з інформаційним. Розподіл каналів проводиться при формуванні сигналів квадратурних каналів: синфазний канал використовується для формування фазоманіпульованного сигналу з розширенням спектра, квадратурний канал використовується для передачі сигналу тактової частоти. Можливість по мінімізації фазової помилки та забезпечення швидкодії системи при стеженні за несучою частотою в даній роботі не розглянута.

В роботі [11] подана нова схема модуляції прямої послідовності для систем зв'язку по розподіленому спектру, яка визначена як модуляція затримки та адресування (DADS). Запропонована схема проста в реалізації та не потребує вирівнювання коду вхідного сигналу на її вході, що робить її найбільш оптимальною для передачі коротких сигналів. В роботі не розкрито тип схеми, відносно якої обґрунтовувались виводи, а також відсутнє питання підвищення порядку астатизму в визначеній схемі.

Певні дослідження щодо можливостей мінімізації дисперсії фазової помилки в КСС з розімкнутим зв'язком та один з варіантів побудови КСС, що має таке поєднання поряд з високою швидкістю системи подано в роботах [11, 12]. У вказаних роботах розроблено та подано математичні моделі КСС з розімкненим зв'язком певного типу та оцінено її можливість щодо мінімізації фазової помилки при порядку астатизму не вище другого. Безпосередньо встановлено, що розімкнутий канал, виконаний у вигляді паралельного (послідовного) включення двох ланок частотного дискримінатора з запропонованою в роботі передавальною функцією, дозволяє підвищити порядок астатизму до третього та вище порядку та не впливає на стійкість системи. У роботі показано, що впливу на дисперсію фазової помилки системи синхронізації, як обґрунтовано в даній роботі, можна досягнути зміною параметрів ланки розімкнутого зв'язку схеми синхронізації системи. Але в вказаних роботах відсутня безпосередня оцінка можливостей мінімізації середньоквадратичної помилки за допомогою розімкнутого (компенсуючого) зв'язку по вхідному сигналу методом зміни його параметрів.

У роботі [13] проведено оцінку можливостей КСС з розімкнутим (компенсуючим) зв'язком щодо мінімізації дисперсії фазової помилки в умовах впливу адитивного гаусівського шуму шляхом підбору параметрів складових елементів схеми побудови даного зв'язку. Подані в роботі результати оцінки показали, що зменшення дисперсії фазової помилки за рахунок введення розірваного зв'язку по заданому рівню впливу залежить від рівня сигналу шуму та від індексу модуляції фази вхідного сигналу. При застосуванні в якості простого розірваного зв'язку частотного дискримінатора, включеного в схему комбінованої системи синхронізації паралельно, мінімальна дисперсія фазової помилки при рості рівня шуму до певної критичної межі має обмеження. А даний розірваний зв'язок втрачає свою ефективність. Питання оцінки більш складних схем розірваного зв'язку в роботі не розглядалися.

Таким чином розробка математичних моделей, які дають змогу синтезувати схеми з складним розімкнутим зв'язком в комбінованих системах синхронізації та оцінка можливостей вказаних схем щодо мінімізації дисперсії фазової помилки є актуальною науковою задачею, розв'язанню якої присвячена дана наукова стаття.

Основна частина. Попередньо встановлено [13], якщо простий розімкнутий зв'язок з передавальною функцією не дозволяє зменшити дисперсію фазової помилки до потрібного значення то представляє практичний інтерес дослідження питання синтезу більш складних варіантів синтезу розімкнутого зв'язку з метою оцінки можливості досягти бажаних результатів в напрямку зменшити дисперсії фазової помилки при стеженні за несучою частотою.

Виходячи з того, що простий розімкнутий зв'язок може бути реалізованим в вигляді паралельної ланки доцільним є дослідження синтезу послідовного поєднання таких ланок, кожна з яких має передавальну функцію виду [13]:

$$W_4(S) = \frac{(K_4 S)}{(T_4 S + 1)} \tag{1}$$

Що дозволяє легко реалізувати цю ланку в вигляді:

$$W_4(S) = \left( \sum_{i=v_4}^n K_{4i} S^i \right) / \left( \sum_{j=0}^m T_{4j} S^j \right) = D_4(S) / F_4(S)$$

Отримаємо передавальні функції комбінованої системи синхронізації по помилці і за збуренням,

$$W_{\phi K}(S) = \frac{D_{\phi K}(S)}{F_3(S)}, \quad W_K(S) = \frac{D_K(S)}{F_3(S)},$$

підставивши в їх відповідні вирази [14]: значення  $W_4(S)$ , визначені виразом (1).

Отримаємо співвідношення, визначені виразом (2).

Аналіз виразів (2) показує, що при такому розімкнутому зв'язку в чисельнику і знаменнику його передавальних функцій є певна кількість коефіцієнтів, що залежать від параметрів розімкнутого каналу. Варіюванням вказаними коефіцієнтами в широких межах можна досягти потрібної якості функціонування системи.

Відомо [7] що проста замкнута система синхронізації (ЗСС) є оптимальною по мінімуму дисперсії фазової помилки. А додаткове зменшення вказаної величини в даній системі неможливе через особливості її функціонування. Якщо прийняти в якості вихідної умови неоптимальну структуру ЗСС то представляє практичний інтерес методом оптимізацію її параметрів оцінити можливість забезпечення потрібної якості перехідного процесу в цій системі. Якщо буде отримана позитивна оцінка що до такої можливості, то в подальшому, методом синтезу розімкнутого зв'язку при умові зменшення дисперсії фазової помилки можна

оцінити можливість що до отримання оптимальності системи по  $\min \Delta \sigma_{\phi}^2$ .

$$W_{\phi K}(S) = \frac{\left[ F_3(S) \prod_{i=1}^n F_{ni}(S) - D_3(S) \prod_{i=1}^n D_{ni}(S) \right] F_1(S) F_2(S)}{\left[ F_1(S) F_2(S) F_3(S) + D_1(S) D_2(S) D_3(S) \right] \prod_{i=1}^n F_{ni}(S)} = \frac{D_{\phi K}(S)}{F_K(S)},$$

$$W_K(S) = \frac{\left[ D_1(S) D_2(S) \prod_{i=1}^n F_{ni}(S) - F_1(S) F_2(S) \prod_{i=1}^n D_{ni}(S) \right] D_3(S)}{\left[ F_1(S) F_2(S) F_3(S) + D_1(S) D_2(S) D_3(S) \right] \prod_{i=1}^n F_{ni}(S)} = \frac{D_K(S)}{F_K(S)} \tag{2}$$

Визначимо параметр  $K_4$  додаткової ланки розімкнутого зв'язку при якому дисперсія фазової помилки в системі КСС не перевищує мінімального значення  $\Delta \sigma_{\phi OPT}^2$  оптимальної системи. Для цього приймемо, що  $\Delta \sigma_{\phi E}^2 = \Delta \sigma_{\phi O}^2$  з чого отримаємо наступне рівняння:

$$\delta_1 K_4^2 + \delta_2 K_4 + \delta_3 - \sigma_{OPT}^2 = 0$$

Значення параметра  $K_4$ , яке можна отримати з цього рівняння, повинно бути позитивним дійсним числом. Для цього необхідно виконати дві умови.

$$\delta_2 < 0 \text{ та } \delta_2^2 - 4\delta_1(\delta_3 - \sigma_{OPT}^2) \geq 0.$$

Перша з цих нерівностей задовольняється при виконанні нерівності (3) [14]:

$$(A_0 K T_1) < \frac{(2q T_2 \omega_c^2 K_m^2)}{(a_0 \omega_c^2 + a_1 \omega_c + a_2)}. \quad (3)$$

Друга нерівність в розгорнутому виді можна подати як:

$$m^2 (A_0 K)^2 - 2q \omega_c^2 K_m^2 (2m+1) (A_0 K) + 4q^2 \omega_c^4 K_m^4 \geq 0$$

При вирішенні цієї нерівності отримаємо наступні дві умови:  $m \geq 0,5$ ,  $A_0 K \geq 4\sqrt{q \omega_c} K_m$ , тобто, для отримання фізично реалізуємого розімкнутого зв'язку, який забезпечить оптимальне значення дисперсії фазової помилки в системі, параметри замкнутого контуру повинні задовольняти наступній умові [14, 15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 K T_1 < m \geq (2q \omega_c^2 T_2 K_m^2) / (a_0 \omega_c^2 + a_1 \omega_c + a_2) \\ m \geq 0,5 \\ A_0 K < 5,65B \end{array} \right\}, \quad (4)$$

$$\text{де } b = \sqrt{2b_1} / 2 = (\sqrt{2q \omega_c} K_m) / 2.$$

Тепер визначимо співвідношення для знаходження параметрів замкнутого контуру з умови забезпечення швидко згасаючого перехідного процесу.

Для того, щоб перехідний процес в КСС завершився в коротший в порівнянні з оптимальною ЗСС термін часу необхідно, щоб корні характеристичного рівняння КСС  $F_K(s) = a_0 s^2 + a_1 s + a_2$  (чи їх дійсні частини) по модулю були більші дійсних частин корнів характеристичного рівняння оптимальної ЗСС. Для досягнення цієї умови повинна виконуватися вимога:  $a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_0 a_2} \gg 2a_0 b$ , а для того, щоб перехідний процес в КСС був аперіодичним, необхідний також забезпечити виконання умови:  $a_1^2 \geq 4a_0 a_2$ . При цьому перша умова буде  $a_0^2 a_0 b$ . Розкривши її отримаємо:  $A_0 K T_1 \gg 2B T_2 - 1$ .

Умова  $a_1^2 \geq 4a_0 a_2$  в розгорнутому виді дає наступні співвідношення.

$$A_0 K T_1 > (2 - m + 2\sqrt{1-m}) / m$$

Отже, спільне рішення нерівностей

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 K T_1 \gg 2B T_2 - 1 \\ A_0 K T_1 > (2 - m + 2\sqrt{1-m}) / m \\ A_0 K T_1 < (2 - m + 2\sqrt{1-m}) / m \end{array} \right\} \quad (5)$$

Дозволяє знаходити параметри замкнутого контуру з умови забезпечення потрібної якості перехідного процесу, а спільний розгляд умов (4) та (5) накладає на параметри замкнутого контуру обмеження, пов'язані з вимогами щодо фізичної реалізуємости розімкнутої ланки.

Введемо наступні позначення:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 2b T_2 - 1, \quad \rho_1 = (2 - m + 2\sqrt{1-m}) / m \\ \rho_3 &= (2q \omega_c^2 T_2 K_m^2) / (a_0 \omega_c^2 + a_1 \omega_c + a_2) = \\ &= \frac{-\omega_c T_2 (1 + T_2) + 4B T_2 \sqrt{1/m + \omega_c T_2}}{2 + m \omega_c T_2} m \end{aligned}$$

Тоді величина  $A_0 K T_1$ , що задовольняє умовам (4) та (5) може бути записана наступним чином:

$$\rho_1 \ll \rho_2 \leq A_0 K T_1 < \rho_3, \quad (6)$$

чи

$$\rho_1 \ll A_0 K T_1 \leq \rho_2 < \rho_3 \quad (7)$$

Проведемо математичне моделювання для отримання даних, необхідних для аналізу можливостей щодо впливу параметрів складного розімкнутого зв'язку комбінованої системи синхронізації на дисперсію фазової помилки вказаної системи.

На рис. 1 подано результати вказаного моделювання в вигляді залежності  $\rho_1 = f(m, T_2)$  з урахуванням вимог, поданих в [14]. Вказані залежності були отримані при наступних значеннях параметрів сигналу і адитивної перешкоди:  $q = 50$ ,  $K_m = 5$ ;  $\omega_c = 10^4$ ;  $b = (\sqrt{2q\omega_c K_m} / 2) = 2,25 \cdot 10^5$ .

Область допустимих значень параметрів системи, що відповідає умовам (6) та (7), на рис. 1 заштриховані.

Аналіз залежностей, поданих на рис. 1 показує, що  $m < 0,5$  умова (6) не виконується (верхній заштрихований сектор перероджується в 0). При  $m > 0,5$  в верхньому секторі не виконується друга вимога системи рівнянь (4). Тому для прийнятих значень допустимим є нижній заштрихований сектор параметрів (7) (в цьому секторі  $m \in [0; 1]$ ).

З другої умови нерівності (4) знаходимо  $A_0 K \leq 5,65\omega$ .

Для  $m=0,5$  отримаємо  $A_0 K = 3,17 \cdot 10^5$ . Оскільки  $\rho_2 (m=0,5) = 0,18$  то в відповідності з (7) прийемо  $A_0 K T_1 = 0,17$ .

Тоді  $T_1 = 5,36 \cdot 10^{-7}$ ,  $T_2 = 1,01 \cdot 10^{-6}$ . При таких значеннях параметрів системи, корні характеристичного рівняння КСС будуть  $S_1 = -5,5 \cdot 10^5$ ;  $S_2 = -6,2 \cdot 10^5$ . Тобто її швидкодія в 2.4 рази більше, чим в оптимальній ЗСС, корні характеристичного рівняння якої дорівнюють  $S_{1,2} = -2,25 \cdot 10^5 (1 \pm j)$ .

Для параметра  $K_4$  розімкнутого зв'язку при цьому отримаємо  $K_4 = 0,69$ .

Визначимо оптимальні значення параметрів замкнутого контуру з умови максимальної швидкодії при оптимальній дисперсії фазової помилки. Раніш було показано, що при зменшенні параметра  $T_2$  збільшується абсолютне значення корнів характеристичного рівняння та швидкодію. Однак мінімальне значення обмежено умовою (4) тобто умовою фізичної реалізуємості розімкнутого зв'язку:

$$T_2 \geq \frac{(a_1 \omega_c + a_0) A_0 K T_1}{2q\omega_c^2 K_m^2 - A_0 K T_1 \omega_c^2}$$

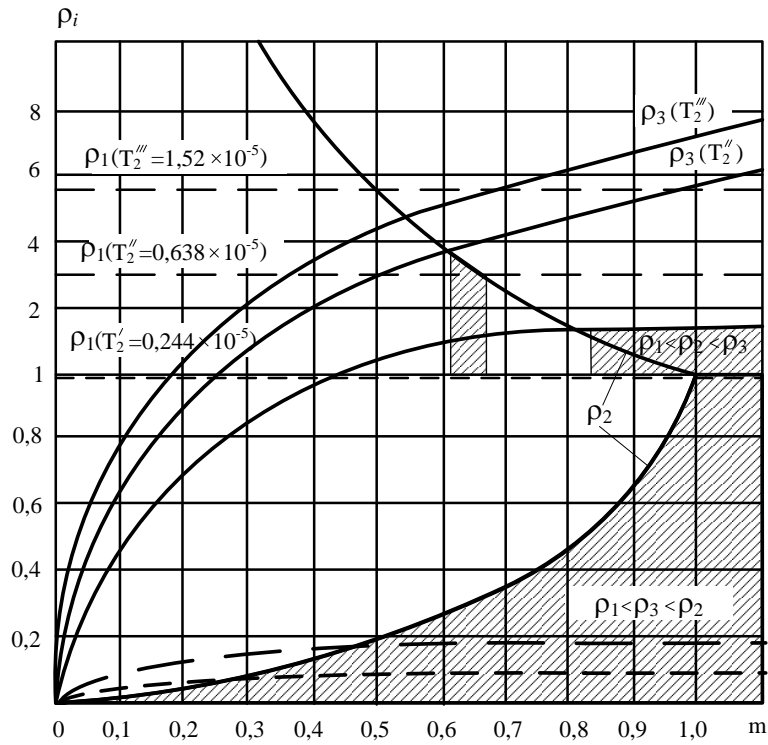


Рис. 1. Залежності  $\rho_1 = f(m, T_2)$

Розкривши цей вираз для граничного виразу  $T_2$  отримаємо наступну нерівність:

$$2q\omega_c^2 K_m^2 - mA_0 K T_2 \omega_c^2 = (mA_0 K)^2 T_2 + mA_0 K (\omega_c + A_0 K)$$

Інші параметри розімкнутого контуру будемо шукати з умови задоволення нерівності (7) –  $A_0 K T_1 \leq \rho_3$ , або в граничному випадку  $A_0 K T_1 = \rho_3$ .

Замінімо  $\rho_3$  наближеним виразом  $\rho_3 \approx (-m\omega_c T_2 + 4b\sqrt{mT_2}) / 2$ . Тоді друге рівняння буде  $2(m A_0 K) = 4b\sqrt{m - m\omega_c}$ .

Знайшовши з нього  $m$  (чи  $A_0 K$ ) і підставивши його в попереднє рівняння отримаємо залежність  $T_2 = f(A_0 K)$  (чи  $T_2 = f(m)$ )

Вирішивши рівняння  $dT_2/dm = 0$  з урахуванням області існування  $m$  (чи  $A_0 K$ ) (4) знайдемо оптимальне значення параметрів фільтра.

Так, для прийнятих вище значень вони будуть:  $T_2 = 0,11 \times 10^{-6}$  м = 0,25;  $A_0 K = 1,27 \times 10^6$

Корені характеристичного рівняння КСС при цьому будуть  $S_1 = -7,95 \cdot 10^6$ .

Отже, швидкодія системи в оптимальному мінімумі дисперсії фазової помилки для КСС, мінімізованої по перехідній помилці вище, чим для ЗСС в 6,44 рази при аперіодичному характері перехідного процесу [15–17].

Такий шлях покращання динаміки дозволяє шляхом оптимізації параметрів замкнутого контуру і відповідним підбором параметрів розімкнутого каналу забезпечити аперіодично швидко затухаючий перехідний процес в системі. Однак він може бути обмежений лиш умовою фізичної реалізації мості ланок системи. Тобто завдання покращання динаміки системи синхронізації може бути вирішене шляхом синтезу більш складних розімкнутих зв'язків, що можуть бути фізично реалізовані. Оцінка таких можливостей та синтез більш складних ланок є окремою науковою задачею, яка буде вирішена в наступних роботах.

**Висновки.** В роботі розроблені математичні залежності, що дозволяють провести синтез запропонованого варіанту складного розімкнутого зв'язку в комбінованій системі синхронізації системи супутникового зв'язку та здійснена оцінка можливостей щодо перспектив мінімізації дисперсії фазової помилки в таких системах шляхом синтезування більш складних схем складного розімкнутого зв'язку.

1. Запропонована в роботі схема складного розімкнутого зв'язку включає дві ланки, з'єднанні послідовно. Оцінка її можливостей показала перспективність такого способу мінімізації фазової помилки в комбінованих системах синхронізації при умові підвищення динаміки системи.

2. Завдяки проведеній оцінці впливу параметрів складної ланки розімкнутого зв'язку на мінімізацію дисперсії фазової помилки комбінованої системи синхронізації від рівня сигналу адитивного гаусівського шуму було показано, що:

– величина дисперсії помилки для комбінованої системи синхронізації значно менша, ніж для замкнутої системи синхронізації при будь-якому виборі параметрів останньої;

– швидкодія системи в оптимальному мінімумі дисперсії фазової помилки КСС, мінімізованої по перехідній помилці значно вище, чим для ЗСС при аперіодичному характері перехідного процесу;

– при застосуванні в якості простого розірваного зв'язку схеми з послідовних ланок частотних дискримінаторів, включених в схему комбінованої системи синхронізації паралельно, мінімальна дисперсія фазової помилки при рості рівня шуму до певної критичної межі має обмеження, а даний розірваний зв'язок втрачає свою ефективність.

Завдання мінімізації фазової помилки при додержанні умови підтримання та збільшення динаміки системи синхронізації може бути вирішене шляхом синтезу більш складних розімкнутих зв'язків, що можуть бути фізично реалізовані.

### Література

1. Горбатий І.В. Системи дистанційного зондування Землі з космосу: монографія / І.В. Горбатий. – Львів : СПОЛОМ, 2011. – 612 с.

2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

3. Бойко Ю.М. Оцінювання якісних показників пристроїв синхронізації сигналів засобів телекомунікацій / Ю. М. Бойко, Р. Ю. Ночка // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 1. – С. 144–155.

4. Глухов, А. В. Оптимизация параметров цифровых фильтров высокоскоростного модулятора для PLC-модем / А. В. Глухов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 19, № 4. – С. 751–756.

5. Lyons, R. G. Understanding Digital Signal Processing / Lyons, R. G. – Boston : Prentice Hall, 2010. – 992 с.

6. Scheers, V. A Modified Direct-Sequence Spread Spectrum Modulation Scheme for Burst Transmissions / V. Scheers, V. A Le Nir // Military Communications and Information Systems Conference (MCC'2010). – Wroclaw, Poland, September 27–28 2010, pp. 366–373.

7. Туровський О. Л. Мінімізація дисперсії фазової помилки в системах фазової синхронізації замкнутого типу в режимі стеження за несучою частотою / О. Л. Туровський // Вісник інженерної академії. – 2019. – № 4. – С. 22–27.

8. Шахтарин, Б. И. Анализ систем синхронизации при наличии помех. 2-е изд., перераб. и доп. / Б. И. Шахтарин. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2016. – 360 с.

9. Kay S. Accurate Single Frequency Estimator / S. Kay, A. Fast // IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing. – 1989. – Vol. 37, No 12, pp. 1987–1990. doi: 10.1109/29.45547

10. Тихомиров, А. В. Синхронизация в системах с прямым расширением спектра / А. В. Тихомиров // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 9. – С. 31–35.

11. Le Nir V. Blind CP-OFDM and ZP-OFDM Parameter Estimation in Frequency Selective Channels / V.Le Nir, T.Van Waterschoot, M. Moonen et al. // *Wireless Com Network*. –2009. –No 315765. <https://doi.org/10.1155/2009/315765>
12. Turovsky O. Combined system of phase synchronization with increased order of astatism in frequency monitoring mode / O. Turovsky, Y. Khlaponin, H. M. Muhi-Aldin et al. // *CEUR Workshop Proceedings*. –2020. – Vol. 2616, Session. 1, pp. 53–62.
13. Turovsky O.L. Estimation of the possibilities of the combined synchronization system with open-link to minimize the dispersion of the phase error when tracking the carrier frequency under the conditions of the influence of additive noise / O. L. Turovsky // *Technology audit and production reserves*. –2020. –Vol 3, No 4, pp. 16–22, DOI: 10.15587/2312-8372.2020.210242.
14. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications Second Edition* / B. Sklar Boston: Prentice Hall, 2017. –1104 p.
15. Бондаренко В. Н. Помехоустойчивость приема спектрально – эффективных шумоподобных сигналов: монографія /В. Н. Бондаренко. – Красноярск : Сибирский Федеральный университет, 2015. –160 с.
16. Бойко Ю. М. Підвищення завадостійкості блоків оброблення сигналів супутникових засобів телекомунікацій на основі модифікованих схем синхронізації // *Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. – 2015. – № 61. – С. 91–107.
17. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and O. Barabash, "Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020.

#### References

1. Horbatyy I.V. *Sistemy dystantsiynoho zonduvannya Zemli z kosmosu: monografiya* / I.V. Horbatyy. – L'viv : SPOLOM, 2011. – 612 s.
2. Levin B. R. *Teoreticheskiye osnovy statisticheskoy radiotekhniki* / B. R. Levin. –M.: Radio i svyaz', 1989. – 656 s.
3. J. M. Boiko, R. Yu. Nochka, Quality evaluation synchronization devices signals of telecommunications // *Herald of of Khmelnytsky National University*. No 1, 2015: 144-155.
4. A.V. Glukhov, Optimization of the parameters of digital filters of a high-speed modulator for PLC-modems // *Bulletin of the Tambov State Technical University*. Vol.19, No.4, 2015:751-756
5. Lyons, R. G. *Understanding Digital Signal Processing* / Lyons, R. G. –Boston : Prentice Hall, 2010. – 992 p.
6. B. Scheers V. A Le Nir, Modified Direct-Sequence Spread Spectrum Modulation Scheme for Burst Transmissions // *Military Communications and Information Systems Conference (MCC'2010)*, – Wroclaw, Poland, September 27–28 2010, pp. 366–373.
7. O.L. Turovsky, Minimization of phase error dispersion in closed-phase phase synchronization systems in carrier frequency tracking mode // *Bulletin of the Engineering Academy*. No. 4, 2019: 22-27.
8. Shakhtarin, BI *Analysis of synchronization systems in the presence of interference*. 2nd ed., Rev. and add. / B. I. Shakhtarin. - Moscow: Hot line - Telecom, 2016. –360 s.
9. S.Kay, A.Fast, Accurate Single Frequency Estimator // *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing*. Vol. 37, No 12, 1989: 1987–1990. Doi: 10.1109/29.45547.
10. A. V. Tikhomirov, Synchronization in systems with direct spreading of the spectrum // *Engineering Bulletin of the Don*. No. 9, 2019: 31–35.
11. V.Le Nir, T.Van Waterschoot, M. Moonen et al. Blind CP-OFDM and ZP-OFDM Parameter Estimation in Frequency Selective Channels // *Wireless Com Network*.No 315765? 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/315765>.
12. O. Turovsky, Y. Khlaponin, H. M. Muhi-Aldin et al. Combined system of phase synchronization with increased order of astatism in frequency monitoring mode // *CEUR Workshop Proceedings*. Vol. 2616, Session. 1, 2020: 53–62.
13. O. L. Turovsky, Estimation of the possibilities of the combined synchronization system with open-link to minimize the dispersion of the phase error when tracking the carrier frequency under the conditions of the influence of additive noise // *Technology audit and production reserves*.Vol 3, No 4, 2020: 16-22, DOI: 10.15587/2312-8372.2020.210242.
14. B. Sklar. *Digital Communications: Fundamentals and Applications Second Edition* / B. Sklar –Boston: Prentice Hall, 2017. –1104 p.
15. V.N. Bondarenko. *Noise immunity of receiving spectrally - effective noise-like signals: monograph* / V. N. Bondarenko. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2015. – 160 s.
16. Boiko, J. M. (2015) "Increasing the noise immunity of signal processing units of telecommunications on the basis of the modified synchronization schemes", *Visnyk NTUU KPI Serii a – Radiotekhnika Radioaпаратobuduvannya*, (61), pp. 91–107.
17. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and O. Barabash, "Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020.

Надійшла / Paper received: 11.05.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020