

**Невгод М.Ю.**

*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ*

### **МІНІМІЗАЦІЯ СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНОЇ ПОМИЛКИ СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ КОГЕРЕНТНОГО ДЕМОДУЛЯТОРА СУПУТНИКОВОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ПРИ УМОВІ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОЇ СКЛАДОВОЇ ФАЗОВОЇ ПОМИЛКИ**

*Успішне вирішення завдання подальшого підвищення ефективності систем супутникового зв'язку багато в чому залежить від якості функціонування систем і пристроїв, що входять до їх складу. Одним з напрямків підвищення ефективності роботи супутникової телекомунікації може бути розробка та удосконалення систем фазової синхронізації в напрямку мінімізації фазової помилки при дотриманні високої динаміки в сталих та перехідних режимах роботи.*

*В роботі розроблені та подані математичні залежності, що дозволяють провести синтез розімкнутого зв'язку в комбінованій системі синхронізації супутникової телекомунікації, які забезпечують мінімізацію середньоквадратичної помилки системи синхронізації при умові обмеження перехідної складової фазової помилки.*

*Запропонована в роботі схема розімкнутого зв'язку включає ланку з передавальними функціоналом, параметри якого дозволяють мінімізувати середньоквадратичну фазову помилку при умові підвищення динаміки системи в перехідних режимах.*

*Результати оцінки ефективності запропонованого методу мінімізації середньоквадратичної помилки комбінованої системи синхронізації при умові обмеження перехідної складової фазової помилки показали що величина середньоквадратичної помилки для комбінованої системи синхронізації залежить від параметра посилення ланки розімкнутого зв'язку. Параметр посилення може бути ефективним по мінімізації фазової помилки в випадку його позитивних значень. Оптимальне значення параметра посилення в поданій моделі синтезу розімкнутого зв'язку має однозначний зв'язок з умовами обмеження перехідної складової фазової помилки а його відхилення від оптимальних значень зменшує ефект ланки розімкнутого зв'язку при роботі в перехідних режимах.*

***Ключові слова:** середньоквадратична фазова помилка, замкнута система синхронізації, комбінована система синхронізації, синтез розімкнутого зв'язку, перехідна складова фазової помилки.*

**Nevgod M.**

*State University of Information and Communication Technologies, Kyiv*

### **MINIMIZATION OF THE ROOT ERROR OF THE SYNCHRONIZATION SYSTEM OF THE COHERENT DEMODULATOR OF SATELLITE TELECOMMUNICATIONS UNDER THE CONDITION OF LIMITING THE TRANSIENT COMPONENT PHASE ERROR**

*A successful solution to the task of further increasing the efficiency of satellite communication systems largely depends on the quality of functioning of the systems and devices included in them. One of the directions for improving the efficiency of satellite telecommunications can be the development and improvement of phase synchronization systems in the direction of minimizing the phase error while maintaining high dynamics in stable and transient modes of operation.*

*Mathematical dependencies are developed and presented in the work, which allow for the synthesis of open communication in the combined synchronization system of satellite telecommunications, which ensure the minimization of the root mean square error of the synchronization system under the condition of limiting the transient component of the phase error.*

*The open communication scheme proposed in the work includes a link with a transfer function, the parameters of which make it possible to minimize the rms phase error under the condition of increasing the dynamics of the system in transient modes.*

*The results of evaluating the effectiveness of the proposed method of minimizing the rms error of the combined synchronization system under the condition of limiting the transient component of the phase error showed that the value of the rms error for the combined synchronization system depends on the gain parameter of the open link link. The gain parameter can be effective in minimizing the phase error in the case of its positive values. The optimal value of the gain parameter in the presented open-loop synthesis model has an unambiguous relationship with the conditions for limiting the transient component of the phase error, and its deviation from the optimal values reduces the effect of the open-loop link when operating in transient modes.*

*Key words: root-mean-square phase error, closed-loop synchronization system, combined synchronization system, open-loop synthesis, transient phase error component.*

## 1. Вступ

Одним з напрямків підвищення ефективності роботи супутникової телекомунікації може бути підвищення швидкості обробки вхідного сигналу, досягти якого можна шляхом підвищення динаміки систем демодуляції вхідних даних. Досягти такої мети можна через проведення наукових досліджень щодо розробки та удосконалення систем фазової синхронізації, які входять в склад функціональних схем когерентних демодуляторів супутникових телекомунікацій. Питання підвищення ефективності системи фазової синхронізації є постійними важливими науковими завданнями і в ряді досліджень вирішуються методом створення відповідних оптимальних схем її побудови в напрямку покращання її основних показників роботи здатності. А саме, мінімізованої дисперсії фазової помилки при підтриманні високої швидкодії обробки вхідного сигналу [1,2].

Очевидно, що системи синхронізації вирішують питання підтримання високої динаміки системи при заданому рівні дисперсії фазової помилки через розробку науково обґрунтованих математичних моделей. Вказані математичні моделі повинні враховувати як параметри складових ланок схеми побудови системи синхронізації так і чинники зовнішніх та внутрішніх збурень, що визначено в якості актуального наукового завдання в роботах [2,3,4].

Робота систем синхронізації когерентних демодуляторів супутникових телекомунікацій характеризується впливом ряду зовнішніх 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 [1,2]. Поряд з зовнішнім впливом на якість роботи системи фазової синхронізації можуть чинити і внутрішні перешкоди та збурення різного характеру, які по суті формують певний перелік негативних внутрішніх факторів [1,2].

Необхідно відмітити, що для ефективної роботи системи синхронізації необхідно безпосередньо забезпечити високу точність її функціонування як сталому так і перехідному режимом стеження за несучої частоти [5]. Тобто, перехідний режим та пов'язаний з ним очевидний вплив на фазову помилку можна віднести теж до внутрішніх негативних факторів [2,5].

Основним підходом щодо покращання динаміки системи синхронізації когерентного демодулятора, яки досліджувався та втілювався в існуючі схеми демодуляторів є врахування

форми сигналу [3,4,5]. Яка, виходячи з особливостей роботи супутникових синхронізації має ступінчасту форму [1,5].

Врахування впливу адитивного гаусівського шуму зазвичай вирішується підбором відповідного фазового фільтру з параметрами, що забезпечують мінімізацію фазової помилки при заданій величині перехідної складової фазової помилки [1,11]. Відомо, що можливості вказаних фільтрів загалом обмежені, значно впливають на динаміку системи обмежуючи її та значно впливають на перехідні процеси в системі.

Одним з шляхів вирішення вказаної проблеми є синтез комбінованої системи синхронізації з розімкнутим зв'язком при умові мінімізації фазової помилки по заданому значенню перехідної складової фазової помилки, яке б враховувало наявність адитивного гаусівського зовнішнього шуму. [1,5].

Таким чином, розробка та створення системи фазової синхронізації вхідного сигналу в напрямку підвищення точності оцінки несучої частоти при забезпеченні її високої динаміки, як передумови підвищення ефективності функціонування супутникових телекомунікацій потребує врахування впливу ефекту перехідного процесу на швидкодію системи. Це обґрунтовує вирішення часткового наукового завдання, направлено на мінімізацію середньоквадратичної фазової помилки системи синхронізації когерентного демодулятора супутникової телекомунікації при умові обмеження перехідної складової фазової помилки.

## **2. Аналіз досліджень і публікацій.**

Питанню оцінки зовнішніх та внутрішніх чинників на ефективність роботи системи фазової синхронізації, розробці ефективних схем таких систем та підвищення їх швидкодії на фоні мінімізації дисперсії фазової помилки присвячено ряд робіт [5,8,9,10,11,12].

Загальні питання підвищення швидкодії системи синхронізації та мінімізації дисперсії фазової помилки методом синтезу розімкнутого зв'язку розглянуто в роботі [8,9]. Подані в роботах математичні залежності та обґрунтовані на їх основі висновки дозволяють провести синтез складного розімкнутого зв'язку та отримати схему комбінованої системи синхронізації з заданим значенням ефективності її показників, що залежить від рівня зовнішнього адитивного гаусівського шуму. Але дана робота не враховує внутрішні чинники, та безпосередньо вплив перехідних процесів що можуть вплинути на ефективність застосування такої схеми.

В статях [10,11] визначено та обґрунтовано можливості щодо поліпшення якості систем синхронізації в класі комбінованих систем синхронізації. В даних роботах визначено, що вказані системи можуть поєднувати принципи регулювання по відхиленню та збуренню з одночасним забезпеченням мінімізації дисперсії фазової помилки, що визначалось в якості перспективних методів побудови такого типу систем. В свою чергу питання врахування перехідних процесів що пов'язані з реакцією системи на вхідні збурення сигналу в даних роботах не обговорені та не враховані.

У роботі [12] подано результати досліджень щодо особливості реалізації системи відновлення несучої частоти при когерентній демодуляції сигналу з безперервною фазою. Подана в роботі схема використовує систему фазового автопідстроювання частоти, що по суті створює розімкнутий зворотній зв'язок в такого типу комбінованій системі синхронізації. В роботі досліджується питання практичної реалізації вказаної системи на сучасній елементній базі. Вплив зовнішніх та внутрішніх чинників на ефективність роботи такої системи та безпосередньо перехідно процеси та вплив їх на поданий тип системи синхронізації в даній роботі не розглянуто.

Робота [5] присвячено розробці комбінованої системи синхронізації в сталих та перехідних процесах. В даній роботі розроблено та подано залежності та на їх основі математичну модель, що дозволяє провести синтез розімкнутого зв'язку при різних коренях характеристичного рівняння перехідного процесу в системі синхронізації. Питання мінімізації фазової помилки при умові заданого обмеження перехідної складової фазової помилки в даній роботі не розглянуто.

### 3. Мета дослідження.

Таким чином, розробка та створення системи фазової синхронізації вхідного сигналу в напрямку підвищення її динаміки та точності оцінки частоти, потребує досліджень, спрямованих на мінімізацію середньоквадратичної фазової помилки з врахуванням регульованого впливу ефекту обмеження перехідної складової фазової помилки є актуальною науковою задачею, розв'язанню якої присвячена вказана стаття.

Розглянемо розв'язання вище визначеного наукове завдання з допомогою синтезу розімкнутого каналу (Рис.1) з передаточною функцією виду (1) [5,13].

### 4. Результати досліджень.

Комбінована система синхронізації (КСС) з ланкою розімкнутого зв'язку, відносно якої проводиться дослідження, подана на Рис.1.

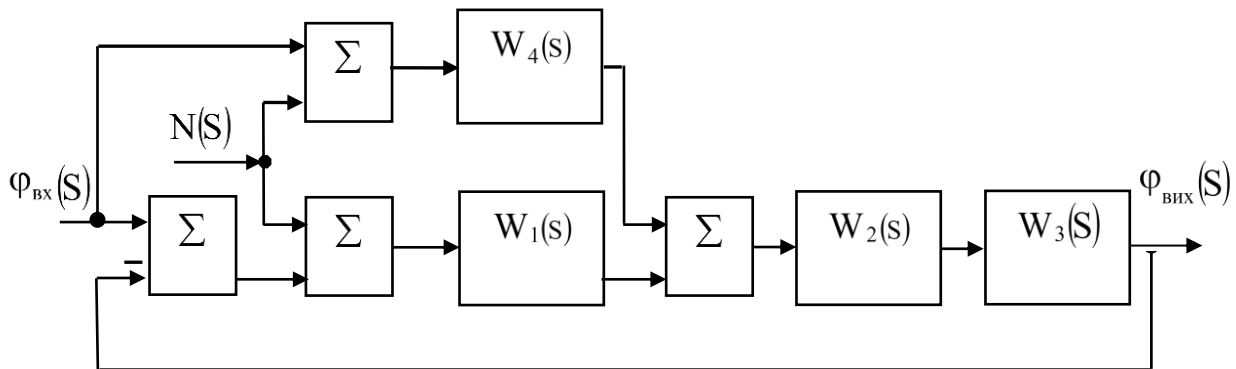


Рис. 1. Структурна схема лінійної моделі КСС з додатковою ланкою.

$$W_4(s) = \frac{K_{4m}S^{K+v-1} + K_{4m-1}S^{K+v-2} + \dots + K_{4v}S^v}{T_{4m}S^{K+v-1} + T_{4m-1}S^{K+v-2} + \dots + T_{40}} = \frac{D_4(s)}{F_4(s)} \quad (1)$$

У цьому випадку необхідно мінімізувати функціонал:

$$I = I_1 + \rho I_2 \quad (2)$$

де:  $\rho$  – множник Лагранжа, що характеризує заданий рівень перехідної помилки:

$$I_1 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(j\omega)|^2 G_N(\omega) d\omega, \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_\varphi(j\omega)|^2 G_{\varphi_{вх}}(\omega) d\omega, \quad (4)$$

Припустимо, що у вході стався стрибок фази величиною  $\varphi_H$ . Тоді:

$$\varphi_{вх}(S) = \frac{\varphi_H}{S}, \quad G_{\varphi_{вх}}(\omega) = \frac{\varphi_H^2}{\omega^2}. \quad (5)$$

Функціонал (5) для КСС можна записати наступним чином:

$$I_K = \frac{\rho}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| W_{\varphi_3}(j\omega) - \frac{W_3(j\omega)}{W_1(j\omega)} W_4(j\omega) \right|^2 G_{\varphi_{\text{вх}}}(\omega) d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| W_3(j\omega) + W_{\varphi_3}(j\omega) W_4(j\omega) \right|^2 G_N(\omega) d\omega. \quad (6)$$

З порівняння виразів (6) з (4) і (3) випливає, що в замкнутій системі синхронізації функціонал основного каналу прийому вхідного сигналу мінімізований за будь-якими параметрами, то в КСС є додаткова можливість його подальшої мінімізації за рахунок параметрів розімкнутого зв'язку [5,13].

Передавальна функція по помилці в КСС у разі розімкнутого зв'язку виду (1) задана виразом (7) [5]:

$$W_{\varphi_{1K}}(S) = \frac{e_{10}S^3 + e_{11}S^2 + e_{12}S}{a_{10}S^3 + a_{11}S^2 + a_{12}S + a_{13}} = \frac{D_{\varphi_{1K}}(S)}{F_{1K}(S)}, \quad (7)$$

$$W_{\varphi_{2K}}(S) = \frac{e_{20}S^3 + e_{21}S^2 + e_{22}S}{a_{20}S^3 + a_{21}S^2 + a_{22}S + a_{23}} = \frac{D_{\varphi_{2K}}(S)}{F_{2K}(S)},$$

Де:  $a_{10}=a_{20}=a_0T_4$ ;  $a_{11}=a_1T_4+a_0$ ;  $a_{12}=a_2T_4+a_0$ ;  $a_{13}=-a_{23}=a_2$ ;  $b_{10}=b_{20}=T_2T_4$ ;  $b_{12}=1-K_3K_4$ ;  $b_{21}=T_4-T_2$ ;  $b_{22}=1-K_3K_4$ ;  $a_{21}=a_1T_4-a_0$ ;  $a_{22}=a_2T_4-a_1$ .

Тоді обидва доданки функціоналу (1) будуть визначатися, як:

$$I_{1K} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| 1 - W_{\varphi_{1K}}(j\omega) \right|^2 \frac{N_0}{2A_0^2} d\omega = A_1K_4^2 + B_1K_4 + C_1, \quad (8)$$

$$I_{2K} = \frac{\rho}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| W_{\varphi}(j\omega) \right|_{\left| \frac{\varphi_H}{j\omega} \right|}^2 d\omega = \rho(A_1K_4^2 + B_1K_4 + C_1),$$

де:

$$A_1 = (K_3^2 N_0) / (2A_0^2 C'); \quad B_1 = (A_0 K K_3 T_4 N_0) / (A_0^2 C');$$

$$C_1 = [A_0 K N_0 (T_4^2 + T_4 + T_2)] / (2A_0^2 C'); \quad C' = (A K T_4^2 + T_2 T_4);$$

$$A_2 = [(T_2 + T_4) K_3^2 \varphi_i^2] / C''; \quad B_2 = [(A_0 K T_2 T_4 - T_2 - T_4) K_3 \varphi_i^2] / C'';$$

$$C_2 = [T_2 + T_4 + A_0 K (T_2^2 + T_4^2) - A_0 K T_2 T_4 - (A_0 K)^2 T_2 T_4] \rho_i^2 / C''; \quad C'' = A_0 K C'.$$

Взявши часткову похідну за параметром  $K_4$  і прирівнявши до її нуля, знайдемо оптимальне значення параметру  $K_4$ , виражене через невідомий множник Лагранжа:

$$K_{4opt} = -(B_1 + \rho B_2) / (2A_1 + \rho A_2) \quad (9)$$

Графік функції  $K_{4opt} = f(\rho)$  представляє собою рівносторонню гіперболу, що подано на Рис.2.

Аналіз залежностей Рис.2 показує, що діапазон можливих значень параметра  $K_4$  обмежений частиною гіперболи, яка відповідає позитивним значенням  $K_4$  і  $\rho$ .

Для визначення параметра  $\rho$ , а отже, і  $K_4$  необхідно задати обмеження на величину перехідної помилки

$$I \leq q \tag{10}$$

Подставив в (8) значення (9) з врахуванням (10) і вирішивши вираз:

$$A_2 \left( \frac{B_1 + \rho B_2}{2A_1 + \rho A_2} \right) - B_2 \frac{B_1 + \rho B_2}{2A_1 + \rho A_2} + C_2 = q, \tag{11}$$

найдем значення  $\rho$ .

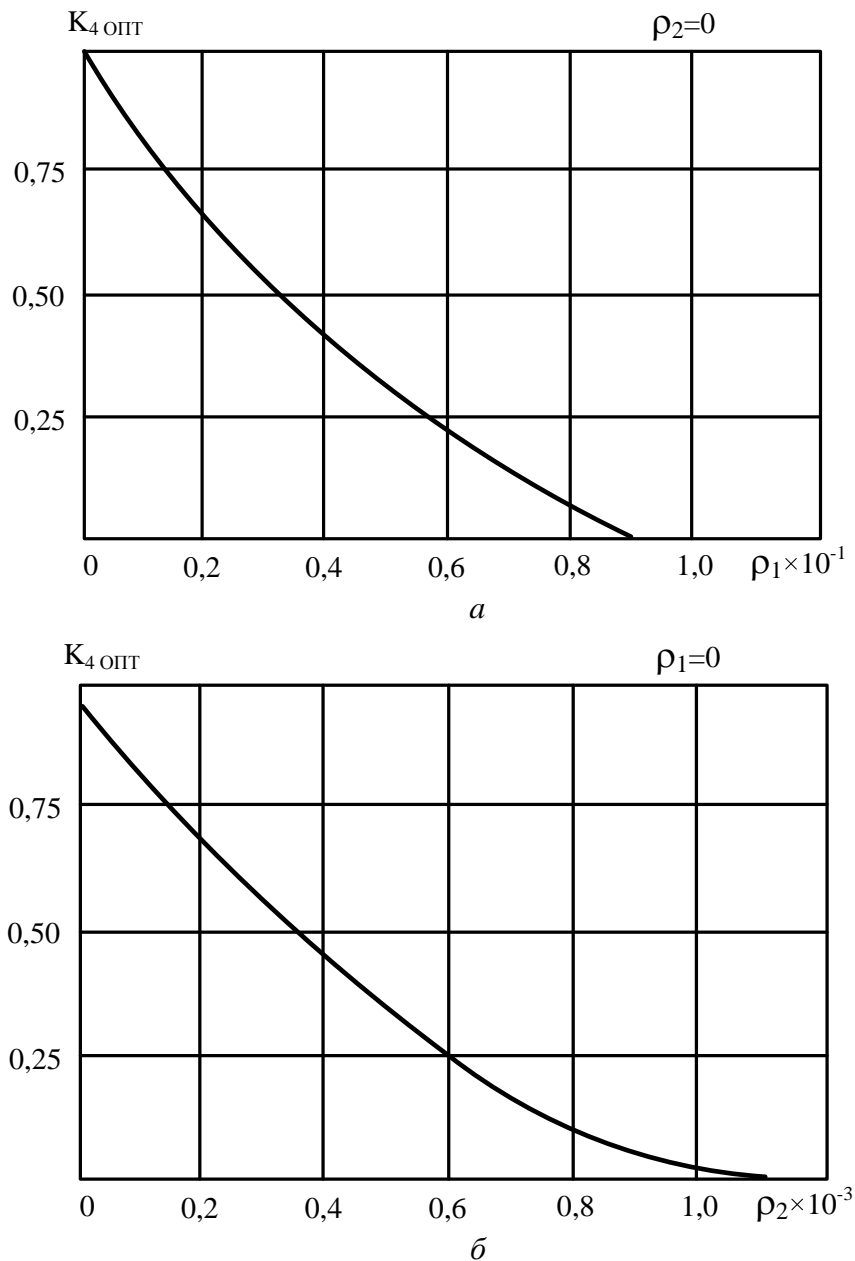


Рис. 2. Графики залежності  $K_{4\text{опт}} = f_1(\rho_1)$  (а) і  $K_{4\text{опт}} = f_2(\rho_2)$  (б)

Оцінимо, чи можливий позитивний ефект від введення розімкнутого зв'язку при вирішенні цього завдання. Для цього представимо функціонал (2) для КСС з урахуванням (8) у наступному вигляді:

$$I_K = (A_1 + \rho A_2)K_4^2 + (B_1 + \rho B_2)K_4 + (C_1 + \rho C_2) = \Delta I_{K1} + \Delta I_{K2} + I_3 \quad (12)$$

де

$$\Delta I_{K1} = (A_1 + \rho A_2)K_4^2; \Delta I_{K2} = (B_1 + \rho B_2)K_4 + I_3 + (C_1 + \rho C_2) \quad (13)$$

Для замкнутої системи синхронізації функціонал можна отримати з (12) при  $K_4 = 0$ .

З рівності (12) видно, що для того, щоб введений розімкнений зв'язок давав позитивний ефект, необхідно виконання наступної нерівності:

$$\Delta I_{K\phi} = \Delta I_{K1} + \Delta I_{K2} \leq 0. \quad (14)$$

Підставивши (12) оптимальне значення параметра  $K_4$  (9), знайдемо значення  $\Delta I_{K\phi}$ :

$$\Delta I_{K\phi} = (A_1 + \rho A_2) \left( \frac{B_1 + \rho B_2}{2A_1 + 2\rho A_2} \right)^2 - (B_1 + \rho B_2) \left( \frac{B_1 + \rho B_2}{2A_1 + 2\rho A_2} \right) = - \frac{(B_1 + \rho B_2)^2}{4(A_1 + \rho A_2)} < 0.$$

Отже, незалежно від параметрів замкнутого контуру, введення розімкнутого зв'язку з передавальною функцією виду (1) дозволяє мінімізувати дисперсію фазової помилки, викликаної адитивним шумом при обмеженні перехідної помилки.

При оптимальному значенні параметра  $K_4$ , що входить в чисельник функціоналу розімкнутого зв'язку КСС значення функціоналу (1) для замкнутої системи синхронізації зменшується на величину  $\Delta I_{K\phi}$ .

При чому  $\Delta I_{K\phi} < 0$  на всій області існування параметра  $\rho$ .

При  $\rho = 0$ ,  $\Delta I_{K\phi} = -B_1^2 / (4A_1)$ , а зі збільшенням  $\rho$ ,  $|\Delta I_{K\phi}|$  також збільшується. Тобто, ефект від введення розімкнутого зв'язку в КСС збільшується.

Якщо  $K_4$  відрізняється від оптимального, ефект від введення розімкнутого зв'язку знижується.

## 6. Висновки.

В роботі розроблені та подані математичні залежності, що дозволяють провести синтез розімкнутого зв'язку в комбінованій системі синхронізації супутникової телекомунікації, які забезпечують мінімізацію середньоквадратичної помилки системи синхронізації при умові обмеження перехідної складової фазової помилки.

1. Запропонована в роботі схема розімкнутого зв'язку включає ланку з передавальними функціоналом, параметри якого дозволяють мінімізувати середньоквадратичну фазову помилку при умові підвищення динаміки системи в перехідних режимах.

2. Для забезпечення обмеження значення перехідної складової фазової помилки в роботі обґрунтовано відповідну умову її обмеження та проведена оцінка ефективності запропонованого методу мінімізації середньоквадратичної помилки при додержанні вказаної умови.

2. Результати оцінки ефективності запропонованого методу мінімізації

середньоквадратичної помилки комбінованої системи синхронізації при умові обмеження перехідної складової фазової помилки показали наступне:

- величина середньоквадратичної помилки для комбінованої системи синхронізації залежить від параметра посилення ланки розімкнутого зв'язку;
- параметр посилення може бути ефективним по мінімізації фазової помилки в випадку його позитивних значень;
- оптимальне значення параметра посилення в поданій моделі синтезу розімкнутого зв'язку має однозначний зв'язок з умовами обмеження перехідної складової фазової помилки а його відхилення від оптимальних значень зменшує ефект ланки розімкнутого зв'язку при роботі в перехідних режимах.

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

### 6. Список використаної літератури.

1. Steklov, V.K., Kostik, V.Y., Berkman, L.N. (2005). *Modern control systems in telecommunications*. Kyiv: Technique, 400.
2. Boiko, Juliy., Pyatin Ivan, Eromenko Oleksander, Barabash Oleg (2020). Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5, 320-327. <https://doi.org/10.25046/aj050242>.
3. Boiko J. (2015). Increasing the noise immunity of signal processing units of telecommunications on the basis of the modified synchronization schemes. *Visnyk NTUU KPI Seria - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, 61, 91-107. doi: 10.20535/RADAP.2015.61.91-107.
4. Turovsky O.L. (2020). 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*. 3(4), 16-22. doi: 10.15587/2706-5448.2020.210242.
5. Berkman, L., Tkachenko, O., Turovsky, O., Fokin, V., & Strelnikov, V. (2021). Designing a system to synchronize the input signal in a telecommunication network under the condition for reducing a transitional component of the phase error. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(9 (109)), 66–76. 2021. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225514>
6. Zhurakovskiy, B., Toliupa, S., Druzhynin, V., Bondarchuk, A., Stepanov, M. Calculation of Quality Indicators of the Future Multiservice Network / *Lecture Notes in Electrical Engineering* this link is disabled, 2022, 831, p. 197–209
7. Туровський, О. Л. Мінімізація дисперсії фазової помилки в системах фазової синхронізації замкнутого типу в режимі стеження за несучою частотою. *Вісник інженерної академії*. –2019. –№4. –С. 22-27.
8. Karpov, Y.O., Vedmitsky, Y.G., Kukharchuk, V.V., Kadiv, S.S. (2012). *Theoretical foundations of electrical engineering. Transients in T33 linear circuits. Synthesis of linear circles. Electric and magnetic nonlinear circuits*. Vinnytsia: VNTU, 530.
9. Oleksandr Turovsky, Valerii Kozlovskiy, Balanyuk Yuriy, Boiko Yuliia, Nataliia Lishchynovska (2020) 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. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 9(5), 8922 – 8928. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/290952020>
10. Boyko, Y.M. (2015). Evaluation of quality indicators of devices for synchronization of signals of telecommunications. *Bulletin of Khmelnytsky National University*, 1, 144–155.
11. Scheers, B. (2010). A Modified Direct-Sequence Spread Spectrum Modulation Scheme for Burst Transmissions. *Military Communications and Information Systems Conference (MCC'2010)*, Wroclaw, Poland, September 27–28, 366–373.



12. Shakhtarin, B.I. (2016). Analysis of synchronization systems in the presence of interference. 2nd ed., Rev. and add. Moscow: Hot line - Telecom, 360.

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.

### References

1. Steklov, B.K., Kostik, B.Y., Berkman, L.N. (2005). Modern control systems in telecommunications. Kyiv: Technique, 400.

2. Boiko, Juliy., Pyatin Ivan, Eromenko Oleksander, Barabash Oleg (2020). Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 5, 320-327. <https://doi.org/10.25046/aj050242>.

3. Boiko J. (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 Radioaparotobuduvannia, 61, 91-107. doi: 10.20535/RADAP.2015.61.91-107.

4. Turovsky O.L. (2020). 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. 3(4), 16-22. doi: 10.15587/2706-5448.2020.210242.

5. Berkman, L., Tkachenko, O., Turovsky, O., Fokin, V., & Strelnikov, V. (2021). Designing a system to synchronize the input signal in a telecommunication network under the condition for reducing a transitional component of the phase error. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(9 (109)), 66–76. 2021. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225514>

6. Zhurakovskiy, B., Toliupa, S., Druzhynin, V., Bondarchuk, A., Stepanov, M. Calculation of Quality Indicators of the Future Multiservice Network / Lecture Notes in Electrical Engineering this link is disabled, 2022, 831, p. 197–209

7. Turovskiy, O. L. Minimization of phase error dispersion in closed-type phase synchronization systems in carrier frequency tracking mode. Bulletin of the Engineering Academy. -2019. - No. 4. Pp. 22-27.

8. Karpov, Y.O., Vedmitsky, Y.G., Kukharchuk, V.V., Kadiv, S.S. (2012). Theoretical foundations of electrical engineering. Transients in T33 linear circuits. Synthesis of linear circles. Electric and magnetic nonlinear circuits. Vinnytsia: VNTU, 530.

9. Oleksandr Turovsky, Valerii Kozlovskiy, Balanyuk Yuriy, Boiko Yuliia, Nataliia Lishchynovska (2020) 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. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 9(5), 8922 – 8928. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/290952020>

10. Boyko, Y.M. (2015). Evaluation of quality indicators of devices for synchronization of signals of telecommunications. Bulletin of Khmelnytsky National University, 1, 144–155.

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

12. Shakhtarin, B.I. (2016). Analysis of synchronization systems in the presence of interference. 2nd ed., Rev. and add. Moscow: Hot line - Telecom, 360.

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.