

УДК 621.376.4:621.396

DOI: 10.31673/2412-9070.2023.045060

М. Ю. НЕВГОД<sup>1</sup>, аспірант;В. О. ДРОБИК<sup>2</sup>, ст. викладач,<sup>1</sup> Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ<sup>2</sup> Національний авіаційний університет, Київ

## **МЕТОДИКА СИНТЕЗУ СИСТЕМИ ФАЗОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ КОГЕРЕНТНИХ ДЕМОДУЛЯТОРІВ ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ РОЗІМКНЕНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

**Одним із чинників внутрішніх збурень та завад у роботі системи синхронізації, які безпосередньо впливають на точність оцінювання частоти-носія та на динаміку всієї системи, є перехідні процеси, спричинені реакцією системи на перехід від одного стаціонарного стану в інший стаціонарний стан. На сучасному етапі досліджень, присвячених питанню мінімізації впливу перехідного процесу на роботу системи фазової синхронізації, підвищення швидкодії та зменшення перехідної складової фазової помилки, яка породжується перехідними процесами, вирішувалось через синтез розімкненого зв'язку системи синхронізації за умов мінімізації фазової помилки в сталих та перехідних режимах роботи.**

**У статті запропоновано розроблену математичну модель і на її основі методика, що дають змогу провести синтез розімкненого зв'язку зі змінною структурою в комбінованій системі синхронізації супутникової телекомунікації, які забезпечують мінімізацію впливу перехідних процесів на ефективність роботи системи синхронізації. Розглядувана схема розімкненого зв'язку зі змінною структурою здатна мінімізувати вплив перехідного процесу на ефективність роботи системи синхронізації через зменшення часу перехідного процесу з огляду на рівень шкідливих збурень перехідного процесу. Здійснене оцінювання можливості розімкненого зв'язку зі змінною структурою щодо впливу на час перехідного процесу показало, що завдяки логічному перемицанню на гілку розімкненого зв'язку з відповідними значеннями оператора часу можна досягти до 6,7 рази зниження часу перехідного процесу.**

**Ключові слова:** середньоквадратична фазова помилка; замкнена система синхронізації; комбінована система синхронізації; синтез розімкненого зв'язку; перехідна складова фазової помилки.

### *Вступ*

Якість приймання, оброблення та демодуляція вхідного сигналу когерентного демодулятора вхідного сигналу супутникової телекомунікації безпосередньо пов'язані з показниками якості функціонування однієї з основних його підсистем, а саме комбінованої системи фазової синхронізації.

Відомо, що одним із чинників внутрішніх збурень та завад у роботі системи синхронізації, які безпосередньо впливають на точність оцінювання частоти-носія та на динаміку всієї системи, є перехідні процеси, зумовлені реакцією системи на перехід від одного стаціонарного стану в інший стаціонарний стан. Для системи фазової синхронізації такими можуть бути збурення, спричинені випадками, коли вхідний сигнал приймається схемою вперше, в разі переривання зв'язку або через доплерівський зсув частот тощо [1; 2].

На сучасному етапі досліджень, присвячених питанню мінімізації впливу перехідного процесу на роботу системи фазової синхронізації, підвищення швидкодії та зменшення перехідної складової фазової помилки, яка породжується перехідними процесами, вирішувалось побудовою відповідних схем, що базувались на різних принципах та реалізовували різні способи їх побудови.

Одним із таких способів є синтез розімкненого зв'язку системи синхронізації за умови мінімізації фазової помилки в сталих та перехідних режимах роботи.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Загальні питання підвищення динаміки системи синхронізації та мінімізації дисперсії фазової помилки методом уведення в схему розімкненого зв'язку розглянуто в [3]. Наведена математична модель дає змогу здійснити синтез складного розімкненого зв'язку та отримати схему комбінованої системи синхронізації із заданим значенням ефективності її показників, що залежить від рівня зовнішнього шуму. Проте тут не бралися до уваги внутрішні чинники та безпосередньо вплив перехідних процесів, що можуть знизити ефективність застосування цієї схеми.

У статтях [4; 5] визначено та обґрунтовано можливості щодо поліпшення якості систем синхронізації в класі комбінованих систем синхронізації. Було обґрунтовано, що зазначені системи можуть поєднувати принципи регулювання за відхиленням та збуренням з одночасним забезпеченням мінімізації дисперсії фазової помилки, що визначалось як перспективні методи побудови такого типу систем. Проте питання щодо перехідних процесів, пов'язаних із реакцією системи на вхідні збурення сигналу, тут не обговорювалися.

У [6] детально розглянуто питання підвищення швидкодії та зменшення перехідної складової фазової помилки, яка породжується перехідними процесами в комбінованій системі синхронізації.

© М. Ю. Невгод, В. О. Дробик, 2023

Розроблено та подано залежності, а далі, на їх основі, математичну модель, що уможливорює проведення синтезу розімкненого зв'язку за різних коренів характеристичного рівняння перехідного процесу в системі синхронізації.

Працю [7] присвячено розбудові системи синхронізації зі складним розімкненим зв'язком, але оцінювання можливостей щодо мінімізації впливу перехідних процесів через розбудову такого зв'язку у цій статті не було розглянуто.

Узагальненим недоліком джерел, присвячених саме синтезу розімкненого зв'язку в системі синхронізації є відсутність оцінювання можливості щодо вдосконалення його структури. Таким удосконаленням може бути, наприклад, синтез складного розімкненого зв'язку чи розімкненого зв'язку, що має можливість функціонувати залежно від параметрів перехідного процесу, тобто розімкнений зв'язок зі змінною структурою здатен зумовити подальшу мінімізацію впливу перехідних процесів на ефективність роботи системи синхронізації. Відповідному формуванню передують розроблення схеми ланки розімкненого зв'язку і створення математичної моделі та окремої методики її синтезу за умови мінімізації впливу перехідного процесу.

**Мета дослідження.** Запропоновано розроблення окремої моделі, а далі на її основі методики синтезу системи фазової синхронізації когерентних демодуляторів зі змінною структурою розімкненого зв'язку, що є актуальною науковою задачею.

**Основна частина**

Розв'язання визначеного наукового завдання здійснювалось за допомогою синтезу розімкненого каналу (рис. 1) з передатною функцією такого вигляду [6–8]:

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

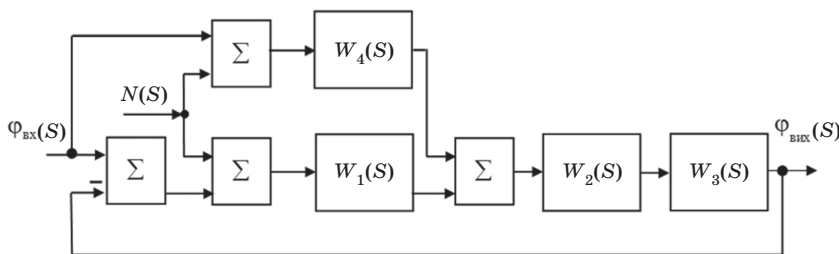


Рис. 1. Структурна схема лінійної моделі КСС із додатковою ланкою

Систему синхронізації з ланкою розімкненого зв'язку (див. рис. 1) синтезовано за умови зменшення перехідної складової помилки з трикутною характеристикою фазового дискримінатора, що використовується як ланка розімкненого зв'язку.

Нормовану статичну характеристику фазового дискримінатора, яку унаочнює рис. 2, аналітично можна дістати з виразу [6]:

$$N(\varphi) = \begin{cases} (2/\pi)\varphi + 1, & -\pi/2 \leq \varphi < 0 \\ (2k-1)\pi \leq \varphi \leq 2k\pi, & \\ -(2/\pi)\varphi + 1, & 0 \leq \varphi < \pi/2 \\ 2k\pi \leq \varphi \leq (2k+1)\pi, & \end{cases} \tag{2}$$

де  $K = \dots -1, 0, 1, 2, \dots$

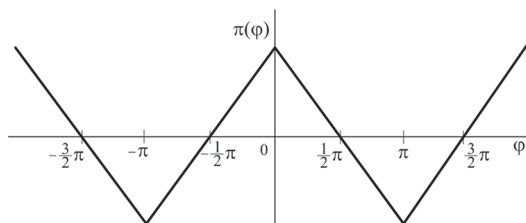


Рис. 2. Нормована статична характеристика фазового дискримінатора

Аналіз залежностей (див. рис. 2) та співвідношень (2) свідчить про те, що значного впливу на перехідний процес у системі синхронізації можна досягти за умови, що на кожному етапі перехідного процесу, тобто руху в часі, рівняння динаміки системи синхронізації можуть бути адаптовані безпосередньо до цього часового етапу. Це можливо реалізувати через розроблення окремих моделей для різних ділянок

нормованої статичної характеристики фазового дискримінатора, які повинні мати елементи розімкненого зв'язку з відповідними параметрами. Тобто, запропонованим способом можна синтезувати розімкнений зв'язок для кусково-лінійної характеристики фазового дискримінатора, що має будь-який вид — трапецієвидний, косинусоїдний, апроксимований відрізками прямих тощо.

Оскільки переважна більшість часу система синхронізації працює в сталому режимі, то потрібно забезпечити необхідну точність роботи системи в режимі, що встановився з хорошою якістю перехідного процесу. Його визначатимемо як мінімальний час та мінімізовану складову фазової помилки. Як відомо, ці вимоги є суперечливими. Для мінімізації цих суперечливих вимог доповнимо розімкнений канал системи синхронізації (див. рис. 1), окрім ланки, що загалом має передатну функцію [7; 8]

$$W_4(S) = (K_4 S) / (T_4 S - 1), \tag{3}$$

ще однією ланкою з передатною функцією:

$$W_4(S) = (K_4 S) / (T_4 S + 1), \tag{4}$$

синтезованою з умови забезпечення мінімуму середньоквадратичної помилки оцінювання фази сигналу в сталому режимі. Передатну функцію (4) синтезовано з огляду на умови, висунуті для параметра підсилення ланки розімкненого зв'язку [6; 7]:

$$K_4 = \delta_2 / (2\delta_1), \quad \delta_2 < 0, \tag{5}$$

який пов'язаний із дисперсією фазової помилки в сталому режимі відношенням [7]:

$$\sigma_{\phi K}^2 = \sigma_1 \left[ \left( K_4 + \frac{\delta_2}{2\delta_1} \right)^2 + \frac{4\delta_1\delta_3 - \delta_2^2}{4\delta_1} \right]. \tag{6}$$

Зі співвідношення (6) однозначно випливає, що функція  $\sigma_{\phi K}^2$  має мінімум у дійсній ділянці за оптимального значення параметра підсилення  $K_4$ .

Структурну схему такої системи синхронізації із розімкненим зв'язком, що має змінну структуру, зображено на рис. 3. за умови, що  $K_+ = \pm(2K_1)/\pi$  залежно від величини, яка визначається за виразом (1).

У разі такої схеми до рівнянь динаміки системи додається ще одне рівняння, що описує поведінку системи синхронізації в режимі, який установився після загасання перехідного процесу.

Для забезпечення роботи змінної ланки в схему потрібно ввести логічний пристрій керування, який має забезпечити роботу цієї ланки відповідно до певної логіки перемикавання. Розглянемо алгоритм роботи та визначимо структуру логічного керувального пристрою (ЛКП), що додається до розімкненого ланцюга системи синхронізації зі змінною структурою.

Зазвичай найпростіший комбінаційний логічний керувальний пристрій (без пам'яті) містить релейні давачі і кінцевий автомат [9]. Дискретні вхідні сигнали ЛКП формуються релейними давачами, а кінцевий автомат формує за заданим алгоритмом вплив, що керує перемиканням. За основний параметр, відповідно до зміни якого потрібно здійснювати перемикавання передатних функцій додаткового розімкненого каналу, візьмемо разову неузгодженість та знак її першої похідної. Отже, вхідними величинами релейних давачів будуть сигнал  $U$ , що знімається з виходу фазового дискримінатора, та його похідна  $dU/dt$ .

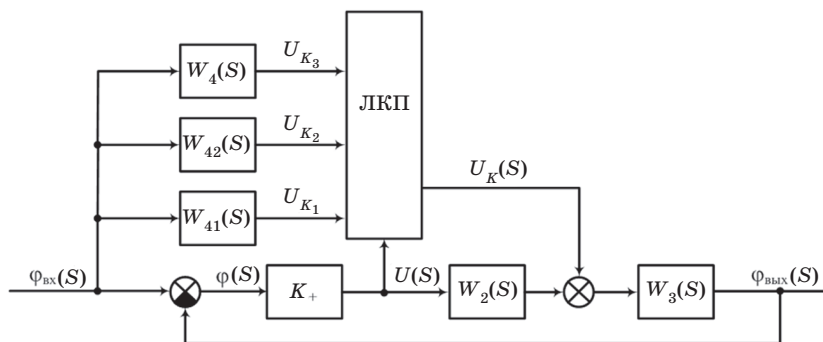


Рис. 3. Структурна схема комбінованої системи зі змінною структурою розімкненого зв'язку

Якщо позначити сигнали з виходу релейних давачів через  $X_1, X_2, X_3$ , їх рівняння в разі автомата з двома вхідними координатами наберуть такого вигляду:

$$U_x = \begin{cases} X_1, & |U| < U_{n1}, \\ \bar{X}_1, & |U| \geq U_{n1}, \end{cases} \quad U_y = \begin{cases} X_2, & U' > 0, \\ \bar{X}_2, & U' < 0, \end{cases} \quad U_z = \begin{cases} X_1, & |U'| > U_{n2}, \\ \bar{X}_3, & |U'| < U_{n2}, \end{cases} \tag{7}$$

де  $X_1, X_2, X_3$  — двійкові змінні, що відповідають наявності вихідного сигналу відповідного давача;

$\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3$  — їх відсутності;  $U_n$  — гранична напруга, що відповідає перемиканню додаткового каналу на ланку в передатній функції  $W_4(S)$ , що забезпечує мінімум СКО.

Перемикання ланок  $W_{41}(S), W_{42}(S)$  розімкненого зв'язку має здійснюватися в моменти, коли зображувальна точка переходить з однієї гілки характеристики фазового дискримінатора на іншу (див. рис. 2), тобто при  $U = U_m = \pm 1$ . Такі моменти мають визначатись давачем максимального сигналу, що виробляє на відповідному виході імпульс залежно від досягнення величиною  $U$  значення  $U_m$  або  $-U_m$ . Ці імпульси використовуються для запам'ятовування знака похідної  $U'$  на відповідному пристрої (тригері Т). За знаком похідної в ці моменти можна визначити, саме яку ланку потрібно підмикати.

Фазовий портрет КСС необхідно будувати в такий спосіб, аби при  $U = +U_m$  і  $U' > 0$ , а також при  $U = +U_m$  і  $U' < 0$  рух відбувався на ділянці нестійкого руху, спричиненого перехідним процесом, а отже, потрібно підмикати ланку з передатною функцією  $W_{42}(S)$ , а в разі  $U = -U_m$  і  $U' < 0$  або  $U = -U_m$  і  $U' > 0$  — ланку  $W_{41}(S)$ .

Перехід на режим (підмікнення ланки  $W_4(S)$  здійснюється під час наближення зображувальної точки до положення стійкої рівноваги, тобто в разі виконання умов  $U < U_{n1}$ . Рух при цьому має відбуватися на ділянці стійкого руху, тобто сигнал, що уможливує підмікнення ланки  $W_{41}(S)$ , має дорівнювати логічній одиниці.

Якщо позначити вихідні сигнали кінцевого автомата, які дають змогу підмикнути ланки  $W_{41}(S), W_{42}(S), W_4(S)$  через відповідно  $U_1, U_2, U_3$ , то алгоритм, що реалізується логічним пристроєм, визначатиметься за таким виразом функції перемикання:

$$U_a = \begin{cases} U_1 \equiv \alpha \Lambda \bar{X}_2 V \bar{\alpha} \Lambda X_2, & \alpha = 1, U = U_m, \\ U_2 \equiv \alpha \Lambda X_2 V \bar{\alpha} \Lambda \bar{X}_2, & \alpha = 1, U = -U_m, \\ U_3 \equiv U_1 \Lambda X_1 V \bar{\alpha} \Lambda X_3, & \end{cases} \quad (8)$$

$$U_K(t) = U_1 \Lambda U_{K1} \Lambda U_2 U_{K2} \Lambda U_3 U_{K3} = (\alpha \Lambda \bar{X}_2 V \bar{\alpha} \Lambda X_2) \Lambda U_{K1} V (\alpha \Lambda X_2 V \bar{\alpha} \Lambda \bar{X}_2) * U_{K2} V (\alpha \Lambda \bar{X}_2 V \bar{\alpha} \Lambda X_2) \Lambda X_1 \Lambda X_3 \Lambda U_{K3}. \quad (9)$$

Визначена виразом (9) функція перемикання дає можливість у подальшому розробити відповідну схему логічного пристрою для його реалізації.

Отже, якщо характеристика фазового дискримінатора, апроксимована  $n$  відрізками прямих в одному періоді, то додатковий розімкнений канал має містити  $n+1$  ланок, виходи яких потрібно з'єднувати паралельно, а виходи під'єднані до  $n+1$  — вхідних схем «ЧИ» логічного пристрою керування.

Залежності перехідної складової фазової помилки, що формується під час перехідного процесу в комбінованій системі синхронізації зі змінною структурою на фоні порівняння із залежністю перехідного процесу для нелінійної замкненої системи синхронізації від часу перехідного процесу, зображено на рис. 4.

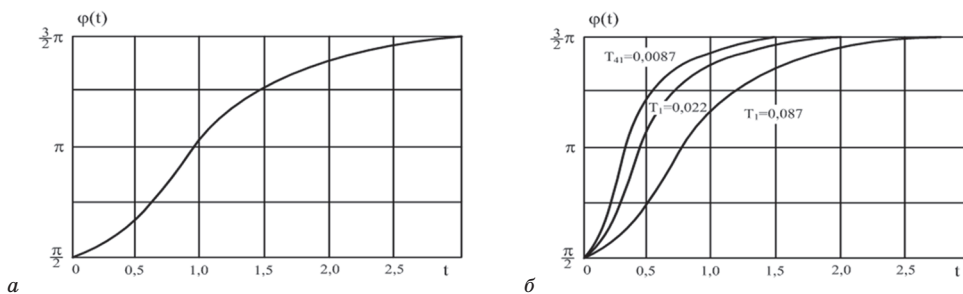


Рис. 4. Графіки залежності перехідної складової фазової помилки залежно від часу перехідного процесу в нелінійній ЗСС (а) і КСС зі змінною структурою (б)

З аналізу здобутих даних випливає, що час переміщення на інтервалі нестійкого руху в комбінованій системі синхронізації зменшується зі зменшенням постійної часу додаткового розімкненого каналу (зі збільшенням додаткового кореня) і менший, ніж у замкненої системі у 5, 6, 15 та 29 разів. Час перехідного процесу менший у 5,2; 6,5 і 6,7 разів у разі значень оператора часу відповідно  $T_{42} = 0,087$  с,  $T_{42} = 0,022$  с,  $T_{42} = 0,0087$  с.

У процесі обчислення часу перехідного процесу в замкненої системі явище щодо ковзання циклів не бралось до уваги. Тобто, початкові умови вибрані такими, що рух зображеної точки на фазовій площині здійснюється в межах дійсних значень величин.

### Висновки

У статті було розроблено математичну модель та на її основі створено методику, що дасть змогу здійснити синтез розімкненого зв'язку зі змінною структурою в комбінованій системі синхронізації супут-



никової телекомунікації, які забезпечують мінімізацію впливу перехідних процесів на ефективність роботи системи синхронізації.

Запропонована схема розімкненого зв'язку зі змінною структурою дає можливість мінімізувати вплив перехідного процесу на ефективність роботи системи синхронізації завдяки зменшенню часу перехідного процесу через врахування рівня шкідливих збурень перехідного процесу.

Оцінювання можливості розімкненого зв'язку зі змінною структурою щодо впливу на час перехідного процесу показало, що за допомогою логічного перемикавання на гілку розімкненого зв'язку з відповідними значеннями оператора часу можна досягти до 6,7 разів зниження часу перехідного процесу.

#### Список використаної літератури

1. *Steklov V. K., Kostik V. Y., Berkman L. N. Modern control systems in telecommunications. Kyiv: Technique, 2005. 400 p.*

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

3. *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 // Technology audit and production reserves. 2020. Vol. 3(4). P. 16–22.*

4. *Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices / J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko, O. Barabash // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. 2020. Vol. 5. P. 320–327.*

5. *Boiko J. Increasing the noise immunity of signal processing units of telecommunications on the basis of the modified synchronization schemes // Visnyk NTUU KPI Seria – Radiotekhnika Radioaparotobudovannia. 2015. Vol. 61. P. 91–107.*

6. *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.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 1(9) (109), P. 66–76. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225514>*

7. *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(5). P. 8922–8928. URL: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/290952020>.*

8. *Невгод М. Ю. Мінімізація середньоквадратичної помилки системи синхронізації когерентного демодулятора супутникової телекомунікації при умові обмеження перехідної складової фазової помилки // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2022. №1(143). С. 44–50.*

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

M. Nevgod, V. Drobik

#### METHODOLOGY FOR THE SYNTHESIS OF THE SYSTEM OF PHASE SYNCHRONIZATION OF COHERENT DEMODULATORS WITH A VARIABLE STRUCTURE OF OPEN COMMUNICATION

One of the factors of internal disturbances and obstacles in the operation of the synchronization system, which directly affect the accuracy of the estimation of the carrier frequency and the dynamics of the entire system, are transient processes caused by the system's reaction to the transition from one stationary state to another stationary state. At the current stage of research devoted to the issue of minimizing the influence of the transient process on the operation of the phase synchronization system, increasing the speed and reducing the transient component of the phase error, which is generated by the transient processes, was solved by synthesizing the open connection of the synchronization system under the condition of minimizing the phase error in steady and transient modes of operation. In the work, a mathematical model and a technique based on it were developed, which allow the synthesis of open communication with a variable structure in the combined synchronization system of satellite telecommunications, which ensure the minimization of the influence of transient processes on the efficiency of the synchronization system. The open communication scheme with a variable structure proposed in the work allows to minimize the impact of the transient process on the efficiency of the synchronization system by reducing the time of the transient process by taking into account the level of harmful disturbances of the transient process. The evaluation of the possibility of an open connection with a variable structure in terms of the effect on the time of the transition process carried out in the work showed that by logically switching to the branch of the open connection with the corresponding values of the time operator, it is possible to achieve up to a 6,7 times reduction in the time of the transition process.

**Keywords:** root-mean-square phase error; closed-loop synchronization system; combined synchronization system; open-loop synthesis; transient phase error component.