

ВОЛОШИН Василь

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0008-6906-6370>

e-mail: voloshinvasily@gmail.com

ДАКОВА Лариса

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0000-0001-6104-8217>

e-mail: dacova@ukr.net

КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ОБРИС МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ ФАЗОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ З КОМБІНОВАНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ У СУПУТНИКОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

У статті систематизовано наукові підходи до підвищення точності дискретних систем фазової синхронізації з комбінованим регулюванням у супутникових телекомунікаційних системах. Розглянуто вплив шуму, доплерівського зсуву, внутрішніх негативних факторів цифрової реалізації та перехідних режимів на фазову помилку. Узагальнено інваріантний підхід до зменшення перехідної складової фазової помилки, змінну структуру розімкненого зв'язку, багатокритеріальну оптимізацію параметрів контуру та застосування адаптивних фільтраційних методів. Виділено аспекти, які в наявних наукових роботах розглянуті, але не вирішені у повному обсязі, і запропоновано узагальнену модель синтезу методу підвищення точності. Показано, що ефективний синтез має одночасно враховувати середньоквадратичну фазову помилку, перехідну складову, час встановлення, запас стійкості, вплив внутрішніх факторів та вимоги до ймовірності бітової помилки.

Ключові слова: дискретна фазова синхронізація, комбіноване регулювання, супутникові телекомунікаційні системи, фазова помилка, доплерівський зсув, перехідний процес, когерентна демодуляція.

VOLOSHYN Vasyli, DAKOVA Larysa

State University of Information and Communication Technologies

CONCEPTUAL OUTLINE OF A METHOD FOR IMPROVING THE ACCURACY OF DISCRETE PHASE SYNCHRONIZATION SYSTEMS WITH COMBINED CONTROL IN SATELLITE TELECOMMUNICATION SYSTEMS

The paper systematizes scientific approaches to improving the accuracy of discrete phase synchronization systems with combined control in satellite telecommunication systems. The influence of noise, Doppler frequency shift, internal negative factors of digital implementation, and transient operating conditions on phase error is analyzed. The study summarizes the invariant approach to suppressing the transient phase-error component, variable open-loop structure techniques, multicriteria loop-parameter optimization, and the use of adaptive filtering methods. Research aspects that have been addressed in the literature but not fully resolved are identified, and a generalized model for synthesizing an accuracy-improvement method is proposed. It is shown that an effective synthesis procedure should simultaneously account for the root-mean-square phase error, transient component, settling time, stability margin, the impact of internal implementation factors, and bit-error-rate constraints.

Keywords: discrete phase synchronization, combined control, satellite telecommunication systems, phase error, Doppler shift, transient process, coherent demodulation.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.07.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.08.2026

Опубліковано / Published 10.09.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ВОЛОШИН Василь, ДАКОВА Лариса

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Підвищення точності роботи дискретних систем фазової синхронізації у супутникових телекомунікаційних системах є актуальним науково-технічним завданням, оскільки саме якість стеження за несучою частотою визначає умови когерентної демодуляції, рівень залишкової фазової помилки, завадостійкість приймання та ймовірність бітової помилки. У супутниковому каналі фазова помилка формується під впливом адитивного шуму, доплерівського зміщення частоти, фазової нестабільності генераторів, похибок цифрового дискримінатора, затримок цифрової обробки, квантування та динамічних перехідних процесів у контурі регулювання.

У працях В. І. Кравченка та М. Ю. Невгода обґрунтовано інваріантний підхід до зменшення перехідної складової фазової помилки системи синхронізації в режимі стеження за несучою частотою [1]. Окремо досліджено вплив негативних внутрішніх факторів на показники роботи системи синхронізації когерентного демодулятора супутникової телекомунікації у сталих і перехідних режимах оцінювання несучої частоти [2]. Це дозволяє розглядати точність фазової синхронізації не як окремий статичний показник, а як результат взаємодії структури системи, параметрів регулятора, шумового середовища та режиму роботи.

АНАЛІЗ НАУКОВИХ РОБІТ, У ЯКИХ ПРОБЛЕМА НЕ ВИРІШЕНА У ПОВНОМУ ОБСЯЗІ

У роботі [1] запропоновано інваріантний підхід до зменшення перехідної складової фазової помилки. Сильною стороною цієї роботи є орієнтація саме на перехідний режим стеження за несучою частотою. Водночас проблема не вирішена повністю, оскільки залишається відкритим питання узгодження інваріантної компенсації з адаптивною зміною параметрів дискретного контуру за умов реальних обмежень цифрової реалізації.

У роботі [2] проаналізовано вплив внутрішніх негативних факторів на показники системи синхронізації. Проблема полягає в тому, що такі фактори доцільно включати не тільки на етапі імітаційного моделювання, а й безпосередньо у процедуру синтезу регулятора. Отже, невирішеною залишається задача формування єдиної моделі, яка одночасно враховує шум, доплерівську динаміку, нестабільність генераторів, квантування та зміну структури розімкненого каналу.

У роботі [3] розглянуто методику синтезу системи зі змінною структурою розімкненого зв'язку. Цей напрям є перспективним, але потребує подальшого розвитку щодо вибору оптимальних порогів перемикавання, запобігання небажаним коливанням під час перемикавання та оцінювання стійкості у момент переходу між структурами.

У роботі [4] розроблено підхід до мінімізації середньоквадратичної помилки за умови обмеження перехідної складової. Однак у повному обсязі не розв'язано проблему багатокритеріального синтезу, коли одночасно враховуються σ_ε^2 , T_{tr} , запас стійкості, обмеження цифрової реалізації та вплив фазової помилки на P_b .

У роботі [5] показано важливість оцінювання впливу фазової помилки на ймовірність бітової помилки. Невирішеним залишається прямий зворотний зв'язок: як саме вимоги до P_b повинні автоматично трансформуватися у параметри системи фазової синхронізації та структуру комбінованого регулювання.

Наукова робота [6] містить цілісну постановку задачі підвищення точності роботи системи фазової синхронізації когерентних демодуляторів супутникових телекомунікацій у перехідних режимах стеження за несучою частотою. У ній розвинено підхід до комбінованих систем синхронізації, але для подальших досліджень актуальними залишаються питання адаптивної цифрової реалізації, оцінювання робастності та порівняння із сучасними Kalman-based tracking методами.

Робота [7] показує, що для систем замкненого типу прагнення мінімізувати дисперсію фазової помилки може погіршувати динаміку системи і не забезпечує підвищення порядку астатизму. Це фактично обґрунтовує потребу в комбінованих схемах, однак не розв'язує повністю задачу синтезу розімкнених ланок зі змінною структурою та адаптивною логікою.

У роботі [8] розглянуто проблеми синтезу пристроїв тактової синхронізації приймачів супутникових телекомунікаційних систем. Вона є важливою для загального розуміння супутникового приймального тракту, але не охоплює у повному обсязі проблему комбінованого фазового регулювання несучої частоти у сталих та перехідних режимах.

Класичні праці з цифрових приймачів і синхронізації [9-12] створюють фундамент для аналізу PLL/DPLL, синхронізаторів, фазових дискримінаторів і фільтрів контуру. Проте вони переважно подають загальну теорію і не розв'язують специфічну задачу поєднання інваріантного підходу, змінної структури розімкненого зв'язку та супутникової динаміки несучої частоти.

Сучасні роботи щодо Kalman-based carrier synchronization [13-15] демонструють потенціал адаптивної фільтрації для підвищення точності стеження. Разом з тим навіть у нових роботах підкреслюється, що зв'язок між параметрами Kalman-based tracking і показниками якості контуру не завжди має простий аналітичний опис [15]. Це означає, що проблема формального синтезу високоточної дискретної системи фазової синхронізації для супутникових телекомунікацій залишається відкритою.

УЗАГАЛЬНЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ АСПЕКТІВ

За результатами аналізу можна виділити такі аспекти, які розглянуті у наукових роботах, але не вирішені у повному обсязі:

- відсутність єдиного багатокритеріального критерію, який одночасно враховує середньоквадратичну фазову помилку, перехідну складову, час встановлення, запас стійкості та ймовірність бітової помилки;
- недостатня формалізація процедури вибору структури розімкненого зв'язку для різних режимів стеження;
- відсутність універсального правила перемикавання між сталим і перехідним режимами у системах зі змінною структурою;
- недостатнє врахування внутрішніх факторів цифрової реалізації під час синтезу регулятора;
- обмежене поєднання інваріантних методів із адаптивними фільтраційними методами типу Kalman-based tracking;
- недостатній зв'язок між вимогами до і параметрами системи фазової синхронізації;
- потреба в порівняльному моделюванні комбінованих, класичних DPLL та адаптивних Kalman-based структур у єдиній системі критеріїв.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою цього матеріалу є розширений аналіз шляхів підвищення точності дискретних систем фазової синхронізації з комбінованим регулюванням у супутникових телекомунікаційних системах, а також виокремлення тих аспектів, які у відомих наукових роботах розглянуті, але не вирішені у повному обсязі.

МАТЕМАТИЧНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ФАЗОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ

У дискретній системі фазової синхронізації фазова помилка в k -й момент часу може бути визначена як різниця між фазою вхідного сигналу та фазою локального керованого генератора:

$$\varepsilon[k] = \varphi_{\text{in}}[k] - \varphi_{\text{g}}[k],$$

де $\varphi_{\text{in}}[k]$ - фаза прийнятого сигналу, $\varphi_{\text{g}}[k]$ - фаза числового керованого генератора, $\varepsilon[k]$ - дискретна фазова помилка.

Для режиму стеження за несучою частотою цільова задача може бути подана як одночасне зменшення середньоквадратичної фазової помилки, перехідної складової фазової помилки та часу встановлення:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varepsilon}^2 &= E\{\varepsilon^2[k]\} \rightarrow \min, \\ |\varepsilon_{\text{tr}}[k]| &\leq \varepsilon_{\text{tr.max}}, \\ T_{\text{tr}} &\rightarrow \min. \end{aligned}$$

У наведених виразах σ_{ε}^2 - дисперсія фазової помилки, $\varepsilon_{\text{tr}}[k]$ - перехідна складова фазової помилки, $\varepsilon_{\text{tr.max}}$ - допустима межа перехідної складової, T_{tr} - тривалість перехідного процесу.

Основна суперечність полягає в тому, що для зменшення шумової складової фазової помилки доцільно звужувати еквівалентну смугу контуру, але для підвищення швидкодії та стійкого стеження за динамічною несучою частотою потрібна більша смуга пропускання і вища динаміка. Саме ця суперечність зумовлює доцільність комбінованого регулювання, змінної структури розімкненого зв'язку та адаптивних методів оцінювання.

КОМБІНОВАНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ЯК НАПРЯМ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ

Комбіноване регулювання передбачає поєднання замкненого каналу керування за фазовою помилкою та додаткового розімкненого або компенсаційного каналу. У дискретній формі загальний сигнал керування можна подати як

$$u[k] = u_{\text{fb}}[k] + u_{\text{ff}}[k],$$

де $u_{\text{fb}}[k]$ - керуюча дія замкненого каналу, $u_{\text{ff}}[k]$ - компенсаційна складова розімкненого каналу. Для замкненого каналу типовим є пропорційно-інтегральний закон:

$$u_{\text{fb}}[k] = K_p \varepsilon[k] + K_i \sum_{m=0}^k \varepsilon[m].$$

Розімкнений канал може враховувати оцінку зміни частоти, прогноз перехідної складової або сигнал інваріантної компенсації:

$$u_{\text{ff}}[k] = K_f \widehat{\Delta\omega}[k] + K_a \hat{\varepsilon}_{\text{tr}}[k].$$

Тоді комбінований закон регулювання набуває вигляду:

$$u[k] = K_p \varepsilon[k] + K_i \sum_{m=0}^k \varepsilon[m] + K_f \widehat{\Delta\omega}[k] + K_a \hat{\varepsilon}_{\text{tr}}[k].$$

Методика синтезу системи фазової синхронізації когерентних демодуляторів зі змінною структурою розімкненого зв'язку розглянута у роботі М. Ю. Невгода та В. О. Дробика [3]. У цій роботі важливим є сам принцип структурної перебудови: у перехідному режимі система повинна мати підвищену швидкодію, а у сталому режимі - мінімізувати шумову та середньоквадратичну складові помилки.

АНАЛІЗ СТАЛОГО РЕЖИМУ СТЕЖЕННЯ ЗА НЕСУЧОЮ ЧАСТОТОЮ

Статий режим відповідає етапу, на якому система вже захопила несучу і виконує її безперервне стеження. Основними показниками якості є дисперсія фазової помилки, середньоквадратична фазова помилка, еквівалентна шумова смуга, стійкість контуру та ймовірність помилки демодуляції.

Узагальнено дисперсію фазової помилки можна подати як суму окремих складових:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \sigma_n^2 + \sigma_d^2 + \sigma_i^2 + \sigma_q^2 + \sigma_{tr}^2,$$

де σ_n^2 - шумова складова, σ_d^2 - складова від доплерівського зсуву, σ_i^2 - складова від внутрішніх факторів, σ_q^2 - складова від квантування та дискретизації, σ_{tr}^2 - залишковий внесок перехідних процесів.

З урахуванням вимог до сталого режиму критерій оптимізації доцільно записати як

$$J_{st} = E\{\varepsilon^2[k]\} + \lambda_1 B_n + \lambda_2 S_u,$$

де B_n - еквівалентна шумова смуга контуру, S_u - показник складності або енергетичної напруженості керування, λ_1 і λ_2 - вагові коефіцієнти.

У праці [4] сформульовано задачу мінімізації середньоквадратичної помилки системи синхронізації когерентного демодулятора за умови обмеження перехідної складової фазової помилки. Цей підхід є важливим для сталого режиму, оскільки мінімізація σ_{ε}^2 не повинна досягатися ціною погіршення перехідної якості або втрати запасу стійкості.

Базовим елементом аналізу є лінійна модель комбінованої системи синхронізації з додатковою ланкою розімкненого зв'язку. Її структурне подання показує взаємодію замкненого каналу $W1(s)$ – $W3(s)$, шумового впливу $N(s)$ та додаткової ланки $W4(s)$, що використовується для зменшення середньоквадратичної фазової помилки за умови обмеження перехідної складової.

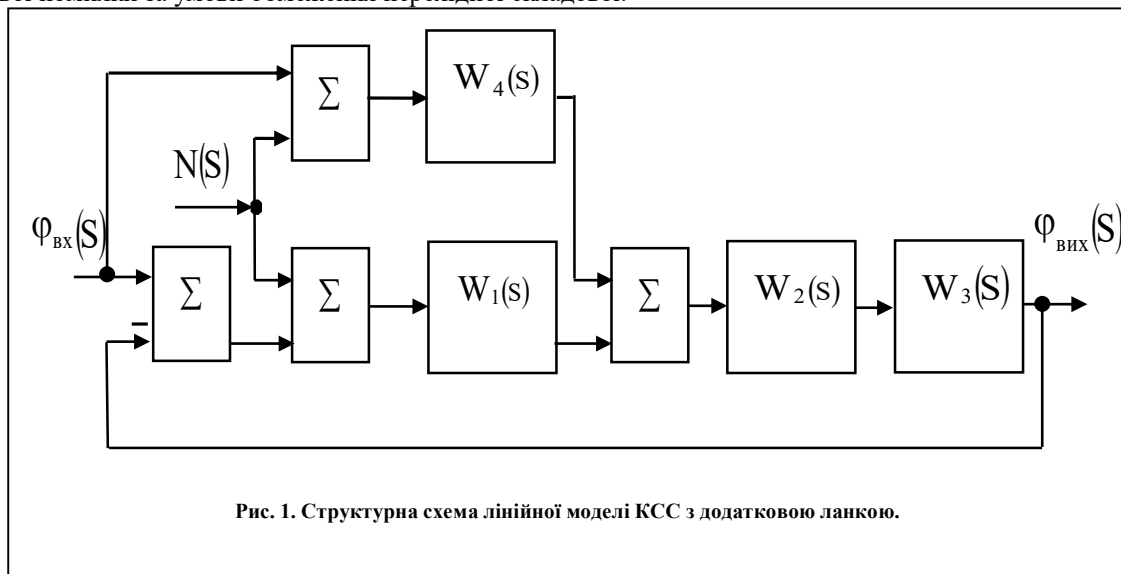


Рис. 1. Структурна схема лінійної моделі КСС з додатковою ланкою.

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНОГО РЕЖИМУ

Перехідний режим виникає під час входження системи у режим стеження, при стрибку фази, зміні доплерівського зміщення, переключенні структури регулятора або зміні параметрів каналу. У цьому режимі критичною є не лише середньоквадратична помилка, а й максимальне перехідне відхилення.

Перехідну складову доцільно визначати як

$$\varepsilon_{tr}[k] = \varepsilon[k] - \varepsilon_{st}[k],$$

де $\varepsilon_{st}[k]$ - стала або квазістала складова фазової помилки.

Комплексний критерій якості перехідного режиму може мати вигляд:

$$J_{tr} = \sum_{k=0}^N \varepsilon_{tr}^2[k] + \mu T_{tr} + \eta \max_k |\varepsilon_{tr}[k]|.$$

Умова переваги комбінованої системи над класичною замкненою системою може бути сформульована так:

$$|\varepsilon_{tr}^{comb}[k]| < |\varepsilon_{tr}^{cl}[k]|,$$

де $\varepsilon_{tr}^{comb}[k]$ - перехідна помилка комбінованої системи, $\varepsilon_{tr}^{cl}[k]$ - перехідна помилка системи замкненого типу.

Вплив фазової помилки на ймовірність бітової помилки для сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією розглянуто у роботі [5]. Це важливо, оскільки перехідна фазова помилка в супутниковому каналі має оцінюватися не тільки як внутрішній параметр контуру синхронізації, а і як фактор погіршення кінцевого показника якості - достовірності приймання.

ОСНОВНІ ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СИСТЕМИ ФАЗОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ

Інваріантна компенсація перехідної складової

Перший шлях полягає у введенні інваріантної компенсації, яка зменшує вплив збурень на фазову помилку. Для цього до розімкненого каналу включають фізично реалізовані ланки, здатні компенсувати прогнозовану або оцінену динамічну складову зміни несучої частоти [1].

Узагальнена умова підвищення порядку астатизму може бути подана як

$$W_{\varepsilon}(z) \sim (1 - z^{-1})^r, \quad r \geq 2,$$

де $W_{\varepsilon}(z)$ - дискретна передавальна функція за помилкою, r - порядок астатизму системи.

Чим вищий порядок астатизму, тим краще система компенсує повільні зміни фази та частоти. Однак підвищення астатизму без додаткового контролю стійкості може спричинити збільшення коливальності, тому інваріантний підхід повинен поєднуватися з аналізом запасів стійкості.

Змінна структура розімкненого зв'язку

Для реалізації змінної структури розімкненого зв'язку доцільно враховувати статичну характеристику фазового дискримінатора, оскільки саме її ділянки визначають умови перемикавання додаткових ланок у перехідному режимі. Нормована статична характеристика фазового дискримінатора, що подана на Рис.1, аналітично подається в вигляді [6]:

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

Така характеристика показана на рис. 2.

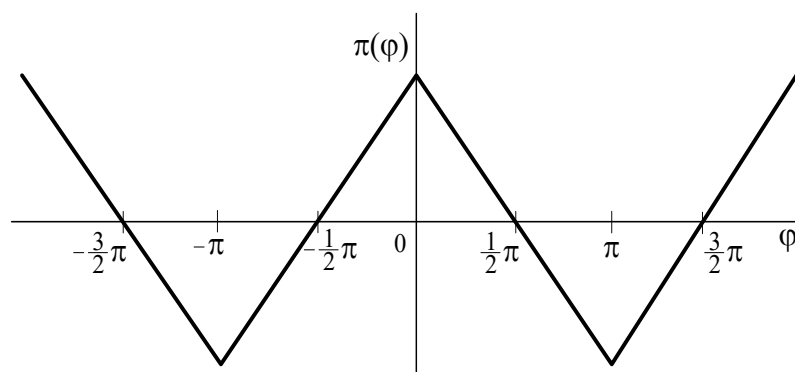


Рис. 2. Нормована статична характеристика фазового дискримінатора [3]

На основі розбиття характеристики фазового дискримінатора на окремі ділянки формується комбінована система зі змінною структурою розімкненого зв'язку. Її узагальнену структурну схему наведено на рис. 3.

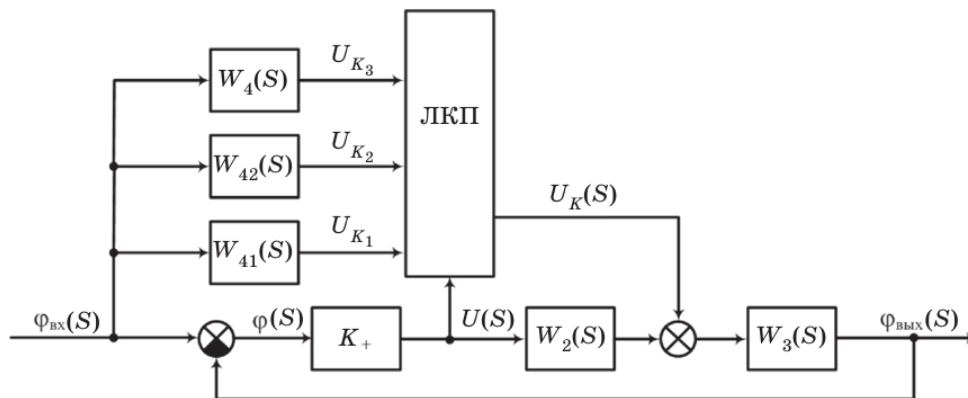


Рис. 3. Структурна схема комбінованої системи зі змінною структурою розімкненого зв'язку [3]

Другий шлях полягає у застосуванні змінної структури розімкненого зв'язку. У перехідному режимі використовується структура з більшою швидкістю, а після входження у сталий режим - структура, орієнтована на зменшення шумової помилки [3]. Логіка перемикавання може бути подана так:

$$W_{\text{ff}}(z, k) = \begin{cases} W_{\text{ff}}^{\text{tr}}(z), & |\varepsilon[k]| > \varepsilon_0, \\ W_{\text{ff}}^{\text{st}}(z), & |\varepsilon[k]| \leq \varepsilon_0. \end{cases}$$

Тут $W_{\text{ff}}^{\text{tr}}(z)$ - структура для перехідного режиму, $W_{\text{ff}}^{\text{st}}(z)$ - структура для сталого режиму, ε_0 - поріг перемикавання.

Ефект застосування змінної структури розімкненого зв'язку в перехідному режимі ілюструється залежностями на рис. 4: порівняння нелінійної замкненої системи та комбінованої системи показує можливість скорочення часу перехідного процесу за рахунок вибору відповідної додаткової ланки.

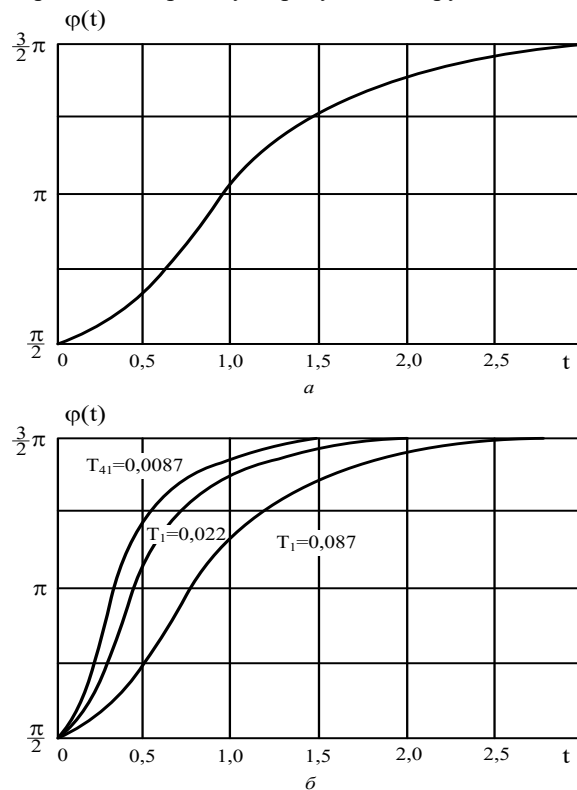


Рис. 4. Залежності перехідної складової фазової помилки від часу перехідного процесу для нелінійної ЗСС та КСС зі змінною структурою [3]

Оптимізація за обмеженням перехідної помилки

Третій шлях полягає у формулюванні задачі синтезу як умовної оптимізації:

$$(K_p^*, K_i^*, K_f^*) = \arg \min_{K_p, K_i, K_f} \sigma_\varepsilon^2,$$

$$|\varepsilon_{tr}[k]| \leq \varepsilon_{tr, \max}, \quad T_{tr} \leq T_{\max}, \quad \zeta \geq \zeta_{\min}.$$

Такий підхід відповідає ідеї мінімізації середньоквадратичної помилки за наявності обмеження на перехідну складову [4]. Його перевага полягає у тому, що система не оптимізується лише за одним показником, а синтезується як багатокритеріальна система керування.

Урахування внутрішніх негативних факторів

Четвертий шлях полягає у включенні до моделі внутрішніх негативних факторів: фазової нестабільності генераторів, неточності дискримінаторів, затримок цифрової обробки, обмеженої розрядності обчислювальних блоків та похибок оцінювання частоти [2]. Без такого урахування система може демонструвати прийнятні результати у моделюванні, але втрачати точність у реальних супутникових трактах.

Структурне подання комбінованої системи синхронізації з додатковою ланкою розімкненого зв'язку, що використовується під час аналізу впливу внутрішніх негативних факторів, наведено на рис. 5. Така схема показує місце додаткового каналу керування $W4(s)$, через який може виконуватися компенсація збурень без зміни базової структури замкненого контуру.

З урахуванням внутрішніх факторів критерій можна записати так:

$$J = \alpha \sigma_\varepsilon^2 + \beta \max_k |\varepsilon_{tr}[k]| + \gamma T_{tr} + \delta \sigma_i^2.$$

Зв'язок фазової помилки з бітовою помилкою

П'ятий шлях полягає у переході від внутрішнього критерію точності контуру до критерію якості демодуляції. Якщо P_b - ймовірність бітової помилки, то для фазоманіпульованих сигналів доцільно розглядати залежність

$$P_b = F(E_b/N_0, M, \sigma_\varepsilon^2),$$

де E_b/N_0 - енергетичне відношення сигнал/шум на біт, M - позиційність фазової маніпуляції, σ_ε^2 - дисперсія фазової помилки. Такий підхід пов'язує синтез системи синхронізації з кінцевою якістю приймання [5].

Використання адаптивних і фільтраційних методів

Шостий шлях пов'язаний із застосуванням адаптивних фільтрів, фільтрів Калмана, FLL-assisted PLL та прогнозних оцінювачів. Такі методи розглядаються у працях щодо цифрової синхронізації та carrier tracking, зокрема в оглядових і прикладних роботах [9]-[15]. Вони дозволяють краще працювати у високодинамічних умовах, однак часто потребують складнішого налаштування параметрів і більшого обчислювального ресурсу.

УЗАГАЛЬНЕНА КОНЦЕПТУАЛЬНА СТРУКТУРА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ ФАЗОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ З КОМБІНОВАНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ У СУПУТНИКОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

З урахуванням проведеного аналізу доцільно розглядати синтез системи фазової синхронізації як задачу багатокритеріальної оптимізації:

$$\min_{\theta} J(\theta) = \alpha \sigma_\varepsilon^2 + \beta \max_k |\varepsilon_{tr}[k]| + \gamma T_{tr} + \delta P_b + \rho C_{impl},$$

де $\theta = \{K_p, K_i, K_f, K_a, \varepsilon_0, B_n\}$ - вектор параметрів системи, C_{impl} - показник складності цифрової реалізації, $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \rho$ - вагові коефіцієнти.

Обмеження задачі можуть бути подані так:

$$\begin{aligned} \sigma_\varepsilon^2 &\leq \sigma_{\max}^2, & |\varepsilon_{tr}[k]| &\leq \varepsilon_{tr, \max}, & T_{tr} &\leq T_{\max}, \\ P_b &\leq P_{b, \max}, & \zeta &\geq \zeta_{\min}, & C_{impl} &\leq C_{\max}. \end{aligned}$$

Така постановка дозволяє поєднати результати інваріантного підходу, змінної структури розімкненого зв'язку, аналізу внутрішніх факторів, мінімізації середньоквадратичної помилки та вимог до кінцевої якості демодуляції.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОЇ НАУКОВОЇ РОБОТИ У ДАНОМУ НАПРЯМКУ

В роботі подано узагальнену концептуальну структуру методу підвищення точності дискретних систем фазової синхронізації з комбінованим регулюванням у супутникових телекомунікаційних системах

1. Проведений аналіз показує, що підвищення точності дискретних систем фазової синхронізації з комбінованим регулюванням у супутникових телекомунікаційних системах повинно здійснюватися не шляхом простого налаштування параметрів замкнутого контуру, а шляхом комплексного синтезу структури системи.

2. Найбільш перспективними напрямками підвищення точності дискретних систем фазової синхронізації є інваріантна компенсація перехідної складової, змінна структура розімкненого зв'язку, багатокритеріальна оптимізація, урахування внутрішніх негативних факторів, зв'язок фазової помилки з ймовірністю бітової помилки та використання адаптивних фільтраційних методів.

3. Існуючі наукові роботи окремо розглядають інваріантність, внутрішні фактори, змінну структуру, мінімізацію середньоквадратичної помилки, вплив фазової помилки на BER та сучасні Kalman-based tracking підходи.

Водночас актуальною залишається задача побудови єдиної методики синтезу дискретної системи фазової синхронізації, яка одночасно забезпечує високу точність у сталому режимі, обмеження перехідної складової, малий час встановлення, робастність до внутрішніх факторів і практичну реалізованість у супутниковому когерентному демодуляторі.

References

1. Кравченко В. І., Невгод М. Ю. Інваріантний підхід до зменшення перехідної складової фазової помилки системи синхронізації в режимі стеження за несучою частотою. Зв'язок. 2022. № 1(155). С. 37-44. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2022.013946>
2. Кравченко В. І., Невгод М. Ю., Захаржевський А. Г. Моделювання впливу негативних внутрішніх факторів на показники роботи системи синхронізації когерентного демодулятора супутникової телекомунікації в сталих та перехідних режимах оцінювання несучої частоти. Зв'язок. 2022. № 2(156). С. 55-61. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2022.025561>
3. Невгод М. Ю., Дробик В. О. Методика синтезу системи фазової синхронізації когерентних демодуляторів зі змінною структурою розімкненого зв'язку. Зв'язок. 2023. № 4(164). С. 25-29. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.045060>
4. Невгод М. Ю. Мінімізація середньоквадратичної помилки системи синхронізації когерентного демодулятора супутникової телекомунікації при умові обмеження перехідної складової фазової помилки. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2023. № 3(80). С. 22-30. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2023.032230>
5. Мелешко Т. В., Невгод М. Ю. Модель оцінки впливу фазової помилки системи синхронізації когерентного демодулятора на ймовірності бітової помилки сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією. Зв'язок. 2023. № 2(162). С. 31-36. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.023136>
6. Невгод М. Ю. Методика підвищення точності роботи системи фазової синхронізації когерентних демодуляторів супутникових телекомунікацій в перехідних режимах стеження за несучою частотою : дис. ... д-ра філософії. Київ : Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, 2024.
7. Turovsky O., Kozlovskyi V., Balaniuk Y., Boiko Y. Minimization of Phase Error Dispersion in Closed Type Phase Synchronization Systems in Carrier Frequency Tracking Mode. EUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2845. P. 382-390.
8. Boiko J. M., Eromenko A. I. Synthesis Problems of Clock Synchronization Devices for Receiver of Satellite Telecommunication Data Transmission Systems. Вісник НТУУ КПІ. Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2012. № 48. С. 10-21.
9. Mengali U., D'Andrea A. N. Synchronization Techniques for Digital Receivers. New York : Springer, 1997. 520 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1807-9>
10. Meyr H., Moeneclaey M., Fechtel S. A. Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing. New York : John Wiley & Sons, 1998.
11. Gardner F. M. Phaselock Techniques. 3rd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2005. <https://doi.org/10.1002/0471732699>
12. Lindsey W. C. Synchronization Systems in Communication and Control. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1972. 695 p.
13. Vilà-Valls J., Closas P., Navarro M., Fernández-Prades C. Are PLLs Dead? A Tutorial on Kalman Filter-Based Techniques for Digital Carrier Synchronization. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2017. Vol. 32, № 7. P. 28-45. <https://doi.org/10.1109/MAES.2017.150260>
14. Kim K.-H., Jee G.-I., Song J.-H. Carrier Tracking Loop using the Adaptive Two-Stage Kalman Filter for High Dynamic Situations. International Journal of Control, Automation, and Systems. 2008. Vol. 6, № 6. P. 948-953.
15. Li Y. et al. Equivalent Loop Bandwidth of Kalman Filter-Based Tracking Method. Electronics. 2025. Vol. 14, № 13. Article 2588. <https://doi.org/10.3390/electronics14132588>