

УДК 621.396

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.064450

Л. Н. БЕРКМАН, доктор техн. наук, професор;
О. Л. ТУРОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доцент;
А. Г. ЗАХАРЖЕВСЬКИЙ, здобувач,
Державний університет телекомунікацій, Київ

ІНВАРІАНТНИЙ ПІДХІД ДО ЗМЕНШЕННЯ СТАЛИХ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК ФАЗОВИХ СИСТЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ В РЕЖИМІ ВІДСТЕЖУВАННЯ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ

Розглянуто системи фазової синхронізації радіотехнічних пристроїв техніки зв'язку. Викладено результати теоретичних досліджень стосовно розробки, аналізу та удосконалення відомих і синтез нових схем синхронізації, що характеризуються високою завадостійкістю, точністю і швидкодією при простоті конструкції. На основі інваріантного підходу запропоновано модель комбінованої системи синхронізації з розімкненим зв'язком, що має низький рівень сталих динамічних похибок завдяки підвищенню порядку астатизму; розв'язано завдання синтезу розімкненого зв'язку в комбінованій системі синхронізації за умови забезпечення інваріантності та підвищення порядку астатизму під час стеження за несучою частотою, що зменшує сталі динамічні похибки системи; запропоновано аналітичні співвідношення та на їх основі методику, яка дає можливість визначити вид і параметри розімкненого зв'язку в комбінованій системі синхронізації за умови забезпечення інваріантності та підвищення порядку астатизму системи до необхідного значення. Завдяки здобутим результатам дійшли таких висновків: уведення в розімкнений канал комбінованої системи синхронізації фізично реалізованих ланок дає змогу синтезувати інваріантні системи з підвищеним порядком астатизму; застосування як розімкнений зв'язок частотного дискримінатора уможливило підвищення порядку астатизму комбінованої системи синхронізації системи до другого порядку. Розімкнений канал, виконаний у вигляді паралельного (послідовного) ввімкнення двох ланок частотного дискримінатора із запропонованою в роботі передатною функцією, дозволяє підвищити порядок астатизму до третього та вищого порядку та не впливає на стійкість системи.

Ключові слова: синхронізація несучої частоти; комбінована система синхронізації; інваріантність системи синхронізації; синтез розімкненого зв'язку; порядок астатизму.

Вступ

Розв'язання завдання подальшого підвищення ефективності систем зв'язку багато в чому залежить від якості функціонування систем і пристроїв, що входять до їх складу. У різні радіотехнічні пристрої техніки зв'язку, радіолокації і керування, а також у пристрої точного магнітного запису широко впроваджено системи фазової синхронізації. Зокрема, в фазокогерентних системах телекомунікації і керування їх застосовують для відновлення несучої і тактової частот та для когерентної демодуляції аналогових і цифрових сигналів із кутовою модуляцією [1].

Функціонування систем синхронізації характеризується впливом низки збурень та шумів на їх роботу. А саме: адитивного флуктуаційного шуму, збурення корисної кутової модуляції (у разі фільтрації несучої частоти), стрибків фази і частоти тощо. У деяких випадках необхідно забезпечити високу точність роботи системи в сталому і перехідному режимах. Так, наприклад, у лініях космічного зв'язку основними збуреннями є адитивний гауссівський шум і доплерівські зміщення частоти. Тому системи синхронізації, що працюють за таких умов, мають характеризуватися малою дисперсією фазової помилки і високою швидкодією [2].

Слід зазначити, що з погляду складних систем система синхронізації являє собою автоматизовану систему керування, завдання якої — відстежування параметрів несучої частоти в штатному і надзвичайному режимах роботи. Тобто, до процесу аналізу роботи та вдосконалення перспективної системи синхронізації можна застосувати інваріантний підхід.

Завадостійкість, точність роботи та швидкодія систем синхронізації впливають на основні показники роботи фазокогерентних систем зв'язку. А теоретичні дослідження щодо розробки, аналізу та вдосконалення відомих і синтез нових схем синхронізації, які характеризуються високою завадостійкістю, точністю і швидкодією при простоті конструкції є актуальним та своєчасним науковим завданням.

У наукових працях, наприклад [3–5], описано дослідження, спрямовані загалом на оптимізацію параметрів фільтра і системи в цілому для класу замкнених систем синхронізації (ЗСС). Однак ЗСС через властиві їм протиріччя не завжди дають змогу забезпечити необхідну якість роботи. Це особливо відчутно, коли потрібно поліпшити якість системи за двома і більшою кількістю суперечливими показниками. Проведений аналіз ЗСС показав, що під час обліку адитивного гауссівського шуму і нестабільності генераторів прагнення мінімізувати дисперсію фазової помилки в класі ЗСС спричинює погіршення динаміки системи та уможливорює збільшення порядку астатизму.

© Л. Н. Беркман, О. Л. Туровський, А. Г. Захаржевський, 2020

Більш істотне поліпшення якості систем синхронізації є в класі комбінованих систем синхронізації (КСС), які можуть поєднувати принципи регулювання за відхиленням і збуренням, що зазначалось як перспективні методи в роботах [1; 6]. Однак можливості КСС різного типу сьогодні мало досліджені.

Аналіз останніх публікацій та постановка проблеми. У більшості праць щодо КСС, наприклад [7–9], здебільшого виконується аналіз їх динаміки під час простого розімкненого зв'язку, що складається з частотного дискримінатора (ЧД) і різних фільтрів (або без них), без урахування шуму.

На відміну від простих систем синхронізації замкненого типу з увімкненням частотного дискримінатора, перспективна комбінована система автоматичної фазової синхронізації, в якій пропонується синтез розімкненого зв'язку за умови підвищення порядку астатизму, має свої особливості, зумовлені специфічними вхідними вузлами замкненого і розімкненого каналів керування [10].

Певні дослідження також проводились стосовно поліпшення якостей ЗСС через зміну схеми реалізації щодо її комбінування та зменшення різними методами мінімальних помилок на етапі фільтрації фази.

У роботі [9] показано особливості реалізації системи відновлення несучої частоти під час когерентної демодуляції сигналу з безперервною фазою. Досліджено питання практичної реалізації системи фазового автопідстроювання частоти на сучасній елементній базі. У статті відсутній розгляд питання синтезу розімкненого зв'язку в схемі, поданої як оптимальна. Також тут не було розглянуто питання підвищення порядку астатизму.

Обґрунтування перспектив проведення досліджень у напрямку синтезу розімкненого зв'язку достатньо добре викладено в [11]. Але сам синтез розімкненого зв'язку в комбінованій системі синхронізації не розглядався.

Автор у [12] запропонував метод здійснення 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 у процесі формування сигналів квадратурних каналів: синфазний канал використовується для формування фазоманіпульованого сигналу з розширенням спектра, квадратурний канал використовується для передавання сигналу тактової частоти.

У цій роботі не розглядався вид схеми стеження, до якої зазначений алгоритм можна застосувати, та не було вивчено питання підвищення порядку астатизму для даного алгоритму.

У [13] подану нову схему модуляції прямої послідовності для систем зв'язку за розподілим спектром визначено як модуляція затримки і адресування (DADS). Запропонована авторами схема проста в реалізації і не потребує вирівнювання коду вхідного сигналу на її вході, що робить її найбільш оптимальною для передавання коротких сигналів. У статті не розкрито тип схеми, відносно якої обґрунтовувались висновки, а також відсутній розгляд питання можливого синтезу розімкненого зв'язку в такій схемі та відсутнє питання підвищення порядку астатизму в визначеній схемі.

Автори роботи [14] пропонують спільне оцінювання синхронізації і зсуву несучої та виявлення даних за допомогою фільтра сигналів, ранжованих за важливістю в каналах адитивного білого гауссівського шуму. У даній роботі здобуто зважений байесівський Крамерський Рао–кордон (WBCRB) для спільного визначення часу та зсуву несучої, який враховує попередній розподіл параметрів оцінювання та є точною нижньою межею для всіх розглянутих значень відношення сигнал/шум (SNR). Не розглянуто питання, пов'язані з типом схеми, на якій пропонується реалізувати запропоноване оцінювання, та питання підвищення порядку астатизму в визначеній схемі.

Автор у [15] пропонує підхід до зменшення похибки оцінювання несучої і символної частоти сигналів із цифровою модуляцією методами, що базуються на аналізі частотних характеристик сигналу. В основу підходу покладено розрахунок першої похідної функції спектральної густини та пошук нуля ітераційним методом хибного положення. Схема, на якій можлива реалізація запропонованого підходу, у роботі не розглядається.

У роботі [16] запропоновано метод виокремлення несучих частот, що використовується у системах радіомоніторингу. Суть методу полягає у визначенні параметрів сигналу за його спектральною формою. Метод складається з таких етапів: отримання даних, їх спектральне перетворення, усереднення, визначення частот та відображення здобутих даних. Використовується в системах радіомоніторингу, які здійснюють радіочастотний контроль. Схема, на якій можлива реалізація запропонованого підходу, у роботі не розглядається.

Таким чином, завдання синтезу більш складних зв'язків у КСС зі змінною структурою та з логічними пристроями, що дають змогу підвищити порядок астатизму системи, зменшити дисперсію постійної і перехідної помилок у процесі відстежування несучої частоти за умов наявності шумів у каналі зв'язку, на даний час не вирішувалися та є актуальною науковою задачею, розв'язанню якої присвячено дану роботу.

Основна частина

У фазокогерентних системах зв'язку необхідно виокремлювати несуче коливання з сигналу, який може бути модульований корисним повідомленням і завадою. Неточності фільтрації фази несучого коливання знижують відношення сигнал/шум на виході когерентного приймача. Тому на етапі фільтрації фази необхідно забезпечити мінімальну помилку. Прагнення збільшити фільтрувальну здатність системи синхронізації в класі ЗСС призводить до неминучого звуження смуги утримання, а прагнення підвищити порядок астатизму погіршує динаміку системи [7; 10].

У даній роботі розглянемо вирішення цих завдань у класі КСС, вільних від зазначених протиріч. Визначимо математичну модель системи синхронізації для когерентного космічного зв'язку. Основними видами шумів на лінії штучний супутник Землі–земна станція є шуми Галактики і шуми дискретних радіоджерел (випромінювання зірок). Причому останні достатньо малі, тому у процесі проектування систем зв'язку враховуються здебільшого шуми Галактики, які мають характер білого гауссівського шуму [2].

Як уже зазначалося, з погляду складних систем система синхронізації являє собою автоматизовану систему керування, завдання якої — відстежування параметрів несучої частоти в штатному та надзвичайному режимах роботи. Тобто, до процесу аналізу роботи та вдосконалення перспективної системи синхронізації можна застосувати інваріантний підхід. Сутність його полягатиме у властивостях комбінованої системи, які зводяться до того, що в даних системах відсутні протиріччя між умовами інваріантності і стійкості. Це забезпечується введенням у систему ланки зворотного зв'язку з близькою до абсолютної інваріантною передатною функцією. У свою чергу, поява такої ланки дає змогу створити вплив на сталі динамічні похибки системи через підвищення порядку її астатизму.

Як зовнішній вплив на систему синхронізації у подальшому будемо розглядати адитивний гауссівський шум, із урахуванням додаткової кутової модуляції за рахунок доплерівського зміщення частоти.

Вхідний і вихідний сигнали системи синхронізації запишемо, відповідно, у такому вигляді [8]:

$$\begin{aligned}x(t) &= \sqrt{2}A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_{\text{вх}}(t)) + n(t), \\r(t) &= \sqrt{2}A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_{\text{вих}}(t)),\end{aligned}\quad (1)$$

де $n(t)$ — адитивний гауссівський шум у каналі з односторонньою спектральною густиною $N_0/2$.

Амплітуду вхідного сигналу візьмемо $A_0 = \text{const}$ і будемо розглядати лише фазу сигналу, модульовану корисним повідомленням і завадою.

Розімкнений канал КСС будемо синтезувати на базі частотного дискримінатора (ЧД) (або послідовного з'єднання кількох ланок з аналогічними передатними функціями, перше з яких — ЧД).

Оскільки вхідними ланками замкненого і розімкненого каналів керування є відповідно фазовий дискримінатор (ФД) і частотний дискримінатор, то замість повних сигналів (1) при $A_0 = \text{const}$ можна розглядати лише їх фази, подавши при цьому ФД у вигляді нелінійної ланки, а ЧД як диференціювальну ланку.

Окрім того, на етапі переходу до математичної моделі необхідно зважати на відповідні перетворення фази і частоти через дії шуму і реакцію реальних ФД і ЧД на суму сигналу і шуму (1).

Так, під час подання на ФД із синусоїдною характеристикою сигналів виду (1), напруга на його виході визначатиметься за виразом [6]:

$$U_{\text{ФД}} = K_{\text{ФД}}(A_0 \sin \varphi + N_{\varphi}),$$

де $K_{\text{ФД}}$ — коефіцієнт передавання ФД; N_{φ} — еквівалентний фазовий шум, $N_{\varphi} = N_{C \cos \varphi} + N_{S \cos \varphi}$; N_C і N_S — відповідно косинусоїдна і синусоїдна складова адитивного білого шуму $n(t)$, що пройшов через вибіркові ланки приймача; $\varphi = \varphi_{\text{вх}}(t) - \varphi_{\text{вих}}(t)$.

Оскільки в даній роботі синтезуються системи синхронізації високої точності, то вважатимемо, що фазова помилка (або її дисперсія) задовольняють умови малості [6], що дає змогу розглядати лінійну модель.

Отже, розглянемо саме особливості синтезу розімкненого зв'язку за умови підвищення порядку астатизму і мінімізації дисперсії фазової помилки під час стеження за несучою частотою.

До складу цієї лінійної моделі системи синхронізації КСС входить додаткова ланка з передатною функцією $W_4(S)$, за допомогою якої здійснено розімкнений зв'язок та утворено розімкнений канал керування.

Скориставшись запропонованою раніше моделлю КСС, розв'яжемо завдання синтезу розімкненого зв'язку за умови підвищення порядку астатизму у процесі стеження за несучою частотою (пілот-сигналом), фаза якої модульована детермінованим доплерівським сигналом, а впливом шуму можна знехтувати. Таке завдання постає, наприклад, в апаратурі багатостанційного доступу, коли опорна станція супутникового зв'язку передає сигнал синхронізації (кодове слово), а всі інші станції на цьому інтервалі передають сигнали з немодульованими несучими.

Якщо ретранслятор встановлено на штучному супутнику зв'язку з низькою орбітою, то основна похибка у відстежуванні фази буде зумовлена доплерівськими відхиленнями частоти. Так, у разі висоти орбіти ШСЗ 2000 км нестабільність частоти за рахунок доплерівського зміщення становитиме $\nu_D = 7 \times 10^{-5}$ [2].

Якщо нестабільність генераторів забезпечує порядок $\nu_G = 10^{-6}$ і несуча частота дорівнює 10 ГГц, то відхилення частоти за рахунок доплерівського ефекту і нестабільностей генератора становитимуть відповідно $\Delta f_D = 7$ МГц, $\Delta f_G = 0,1$ МГц.

Так, під час передавання телевізійного ЧМ сигналу з шириною смуги $\Delta F = 60$ МГц нестабільності генераторів практично не впливають на завадостійкість ($\Delta f_G \ll \Delta F$) і ними можна знехтувати [2; 6].

Розглянемо КСС із розімкненим зв'язком за умови підвищення порядку астатизму.

Структурну схему комбінованої системи синхронізації КСС зображено на рис. 1, де $W_4(S)$ — передатна функція ланки, що синтезується.

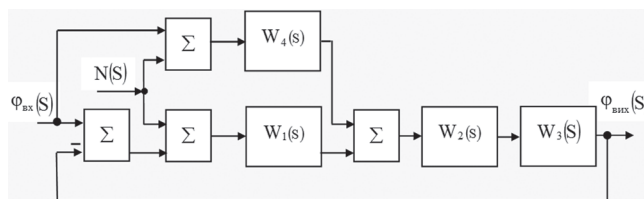


Рис. 1. Структурна схема лінійної моделі КСС із додатковою ланкою

Відповідно до схеми запишемо рівняння динаміки КСС:

$$\varphi(S) = \varphi_{вх}(S) - \varphi_{вих}(S), \quad \varphi_{вих}(S) = W_3(S)\Sigma(S), \quad \Sigma(S) = W_4(S)\varphi_{вх}(S) + W_1(S)W_2(S)\varphi(S).$$

Якщо вивести проміжні змінні, дістанемо рівняння динаміки КСС щодо помилки:

$$[l + W_1(S)W_2(S)W_3(S)]\varphi(S) = [l - W_3(S)W_4(S)]\varphi(S). \quad (2)$$

Аналіз виразу (2) дає можливість визначити умову абсолютної інваріантності [18]:

$$l - W_3(S)W_4(S) = 0.$$

З огляду на те, що $W_l(S) = D_l(S)/F_l(S)$, перепишемо рівність (2) у такий спосіб:

$$[F_1(S)F_2(S)F_3(S) + D_1(S)D_2(S)D_3(S)]F_4(S)\varphi(S) = [F_3(S)F_4(S) - D_3(S)D_4(S)]F_1(S)F_2(S)\varphi_{вх}(S). \quad (3)$$

Із цього випливає, що знаменник передатної функції розімкненого каналу $F_4(S)$ входить у характеристичне рівняння КСС (3) у вигляді співмножника

$$F_k(S) = [F_1(S)F_2(S)F_3(S) + D_1(S)D_2(S)D_3(S)]F_4(S) = F_3(S)F_4(S),$$

де $F_3(S) = F_1(S)F_2(S)F_3(S) + D_1(S)D_2(S)D_3(S)$ — характеристичний поліном КСС.

Тому розімкнений зв'язок не впливає на стійкість системи [19].

Наявність різниці в правій частині рівняння динаміки КСС (3) дає змогу завдяки відповідному вибору поліномів $D_4(S)F_4(S)$ впливати як на сталу, так і на перехідну складові помилки [15].

Отже, для досягнення абсолютної інваріантності в системі передатна функція розімкненого каналу повинна мати такий вигляд:

$$W_4(S) = l/W_3(S) = F_3(S)/D_3(S) = F_4(S)/D_4(S). \quad (4)$$

Звідси випливає, що порядок поліному $D_4(S)$ має бути вищим за порядок поліному $F_4(S)$, що неможливо за умов фізичної реалізації [13; 17].

Таким чином, досягнення абсолютної інваріантності в неперервних системах за допомогою ланок або обчислювальних пристроїв неперервного типу неможливе. Проте введення в розімкнений канал системи фізично реалізованих ланок $W_4(S)$ дає змогу підвищити порядок астатизму системи і синтезувати ϵ -інваріантні системи [18].

Як випливає з розглянутих прикладів, для зменшення сталої помилки необхідно підвищувати порядок астатизму системи. Причому значення, до якого ми прагнемо у процесі синтезу системи, визначається характером зміни вхідного впливу і вимогами до точності системи в сталому режимі.

Запишемо в загальному вигляді передатну функцію фізично реалізованого розімкненого зв'язку:

$$W_4(S) = \frac{\sum_{i=0}^n K_{4_i} S^i}{\sum_{j=0}^m T_{4_j} S^j} = \frac{D_4(S)}{F_4(S)}, \quad m \geq n. \quad (5)$$

Порядок астатизму системи ν_l визначається ступенем оператора S , що є загальним множником чисельника передатної функції за помилкою [18].

Передатна функція за помилкою КСС набере вигляду

$$W_{\varphi K}(S) = \frac{[F_3(S)F_4(S) - D_3(S)D_4(S)]F_1(S)F_2(S)}{[F_1(S)F_2(S)F_3(S) + D_1(S)D_2(S)D_3(S)]F_4(S)} = \frac{D_{\varphi K_0}(S)}{F_K(S)}. \quad (6)$$

Підставивши у (6) вираз (5) і заклавши вимогу, щоб система мала астатизм порядку $v_K = l$, дістанемо вираз для чисельника передатної функції, яка визначається рівністю (6):

$$D_{\varphi_K}(S) = \left[F_3(S) \sum_{j=0}^m T_{4_j} S^j - D_3(S) \sum_{i=0}^n K_{4_i} S^i \right] F_1(S) = D_{\varphi_{K_0}}(S) S^l. \tag{7}$$

Завдання зводиться до вибору коефіцієнтів K_{4_i} і T_{4_j} передатної функції розімкненого каналу так, щоб поліном $D_{\varphi_K}(S)$ містив S^l як загальний множник.

Слід зауважити, що поліном $F_4(S)$ входить до характеристичного рівняння комбінованої системи синхронізації. Тому діапазон зміни параметрів T_{4_j} обмежений вимогами до якості перехідного процесу.

Якщо порядок вищої похідної вхідного сигналу r і потрібно усунути усталену помилку, то має виконуватись нерівність $l > r$.

Загальний вигляд передатної функції $W_4(S)$ розімкненого зв'язку, що задовольняє умову (5) і забезпечує $v_K = l$, визначається за виразом [17]:

$$W_4(S) = \frac{\sum_{i=v_3}^n K_{4_i} S^i}{\sum_{j=0}^m T_{4_j} S^j} = \frac{D_4(S)}{F_4(S)}, \tag{8}$$

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

Зазвичай беруть $m = n$. Вища ступінь поліномів $D_4(S)$ і $F_4(S)$ буде такою: $v_3 + \Delta v - l = m$, де $\Delta v = l - v_3$ — величина, на яку необхідно підвищити порядок астатизму.

Отже, $m = l - 1$.

Оскільки порядок астатизму вихідної системи $v_3 = 1$, то вираз (8) набере вигляду

$$W_4(S) = \frac{\sum_{i=1}^{l-1} K_{4_i} S^i}{\sum_{j=0}^{l-1} T_{4_j} S^j} = \frac{D_4(S)}{F_4(S)}. \tag{9}$$

Підставивши поліноми $D_4(S)$, $F_4(S)$ з (9) в (7), дістанемо

$$D_{\varphi_K}(S) = (T_{40} - K_3 K_{41})S + (T_{41} - K_3 K_{42})S^2 + \dots + (T_{4(l-2)} - K_3 K_{4(l-1)})S^{(l-2)} + (T_{4(l-2)})S^l. \tag{10}$$

Із виразу (10) з урахуванням (7) дістаємо:

$$\begin{bmatrix} T_{40} - K_3 K_{41}, \\ T_{41} - K_3 K_{42}, \\ \dots, \\ T_{4(l-2)} - K_3 K_{4(l-1)} = 0 \end{bmatrix}$$

Визначимо вид передатної функції розімкненого зв'язку для розглянутих раніше випадків.

Порядок вищої похідної вхідного сигналу $r = 1$. Необхідний порядок астатизму $l = 2$. Передатну функцію розімкненого зв'язку відповідно до виразу (9) можна подати у вигляді

$$W_4(S) = \frac{K_{41} S}{T_{41} S + T_{40}}. \tag{11}$$

Поліном (10) при цьому набуває значення

$$D_{\varphi_K}(S) = (T_{40} - K_3 K_{41})S + T_{42} S^2.$$

У разі виконання умови $K_{41} = T_{40} / K_3$ дістанемо $D_{\varphi_K}(S) = T_{41} S^2$, тобто застосування як розімкнений зв'язок частотного дискримінатора дає можливість підвищити порядок астатизму системи до другого порядку.

При $r = 2$; $l = 3$ передатна функція $W_4(S)$ набере вигляду

$$W_4(S) = (K_{42} S^2 + K_{41} S) / (K_{42} S^2 + T_{41} S + T_{40}).$$

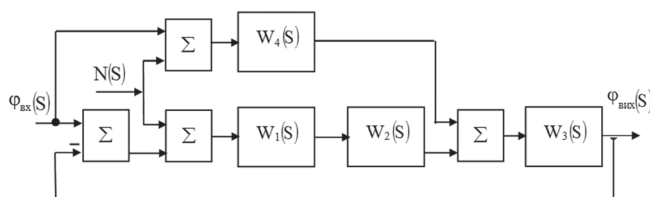


Рис. 2. Структурна схема лінійної моделі КСС із послідовним увімкненням додаткових ланок

Із виразу (10) випливає, що $T_{40} - K_3 K_{41} = 0$, $T_{41} - K_3 K_{42}$, а отже, $D_{\varphi_K}(S) = T_{42} S^2$, тобто отримаємо систему синхронізації з астатизмом третього порядку.

Розімкнений канал із такою функцією передавання може бути виконаний у вигляді паралельного (послідовного) ввімкнення двох ланок із передатною функцією виду (11).

Структурну схему комбінованої системи синхронізації КСС із розімкненим каналом із увімкненням двох ланок як варіант реалізації, зображено на рис. 2.

Висновки

У статті розглянуто особливості синтезу фазових КСС за умови підвищення точності і стійкості їх роботи в режимі відстежування несучої частоти.

Здано аналітичні співвідношення та розроблено методику, яка на основі інваріантного підходу дає можливість визначити вид і параметри розімкненого зв'язку в комбінованій системі синхронізації за умови підвищення порядку астатизму системи до необхідного значення, що забезпечує зменшення значень сталих динамічних похибок системи та підвищує стійкість та динамічність системи.

Аналіз результатів моделювання за допомогою запропонованих виразів показав, що введення в розімкнений канал комбінованої системи синхронізації фізично реалізованих ланок дає змогу підвищити порядок астатизму системи і синтезувати інваріантні системи.

Застосування як розімкнений зв'язок частотного дискримінатора дає можливість підвищити порядок астатизму комбінованої системи синхронізації системи до другого порядку.

Розімкнений канал, виконаний у вигляді паралельного (послідовного) увімкнення двох ланок частотного дискримінатора із запропонованою в роботі передатною функцією, дозволяє підвищити порядок астатизму до третього та вищого порядку та не впливає на стійкість системи.

Запропоновані в роботі аналітичні вирази можуть стати основою методики синтезу КСС за умови підвищення точності в сталому режимі.

У зазначеній методиці потрібно зважати на кілька дестабілізуючих чинників, а саме: доплерівське зміщення, нестабільність генераторів та адитивний шум із врахуванням особливостей роботи в цих умовах фазового і частотного дискримінаторів.

Подальшим напрямком досліджень є синтез розімкненого зв'язку в комбінованих системах синхронізації на фоні адитивного гауссівського шуму з урахуванням фазової нестабільності генераторів.

Список використаної літератури

1. **Шахтарин Б. И.** Анализ систем синхронизации при наличии помех: 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Горячая линия – Телеком, 2016. 360 с.
2. **Паршуткин А. В., Маслаков, П. А.** Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех // Труды СПИИРАН. 2017. 4(53). С. 159–177.
3. **Бойко Ю. М.** Оцінювання якісних показників пристроїв синхронізації сигналів засобів телекомунікацій // Вісник Хмельниць. нац. ун-ту. 2015. № 1. С. 204–213.
4. **Глухов А. В.** Оптимизация параметров цифровых фильтров высокоскоростного модулятора для PLC-модем // Вестник Тамбов. гос. техн. ун-та. 2013. Т. 19, № 4. С. 751–756.
5. **Lyons R. G.** *Understanding Digital Signal Processing*. Boston: Prentice Hall, 2010. 992 p.
6. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: 2-е изд. / пер. с англ. Москва: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1099 с.
7. **Бойко Ю. М., Поліщук А С.** Проблеми синхронізації автоколивальних систем під зовнішнім періодичним впливом // Вісник Хмельниць. нац. ун-ту. Технічні науки. 2010. №2. С. 156–162.
8. **Бойко Ю. М., Єрмоленко О. І.** Аналіз моделей систем синхронізації у цифрових приймачах // Матеріали XIV міжнар. наук.-практ. конф. Одес. нац. академія зв'язку ім. Попова. м. Одеса, 5-10 червня, 2015 р. С. 192–194.
9. **Кучер Д. Б., Макогон В. П.** Відновлення несучої при когерентній демодуляції сигналу з безперервною фазою засобів зв'язку // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2013. № 2(11). С. 148–149.
10. **Kay S., Fast A.** Accurate Single Frequency Estimator // IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing. 1989. V. 37, No 12. P. 1987–1990.
11. **Тихомиров А. В., Омелянчук Е. В., Семенова А. Ю.** Синхронизация в системах с прямым расширением спектра // Инженерный вестник Дона. 2019. №9. С. 31–35.
12. **Канатчиков А. А., Куликов Г. В.** Исследование возможностей построения системы тактовой синхронизации на базе автокорреляционного демодулятора для приема сигналов с минимальной частотной манипуляцией // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 152. С. 11–15 (Серия Радиофизика и радиотехника).
13. **Scheers B., Le Nir V.** 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. 366–3673.

14. Nasir A. A., Durrani S., Kennedy R. A. Particle filters for joint timing and carrier estimation: Improved resampling guidelines and weighted bayesian cramer-rao bounds // *IEEE Trans. Commun.* 2012. №60(5). P. 1407–1419.

15. Нагорнюк О. А. Покращення точності оцінювання несучої та символної частоти сигналів з цифровою модуляцією. Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць ЖВІ НАУ. 2013. Вип. 8. С. 62–70.

16. Пищак І. І. Метод виявлення частот в ефірі радіосигналу // *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Комп'ютерні системи та мережі.* 2012. № 745. С. 164–167.

17. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: в 3-х томах, изд. 4-е, перераб. и доп. / пер. с англ.: Б. Н. Бронина, И. И. Короткевич, А. И. Коротова, М. Н. Микшица, Л. В. Поспелова, О. А. Соболевой, К. Г. Финогенова, Ю. В. Чечёткина, М. П. Шарпова. Москва: Мир, 1993.

18. Мисриханов М. Ш. Инвариантное управление многомерными системами. Москва: Энергоатомиздат, 2003. 236 с.

Л. Н. Беркман, А. Л. Туровский, А. Г. Захаржевский

ИНВАРИАНТНЫЙ ПОДХОД К УМЕНЬШЕНИЮ ПОСТОЯННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФАЗОВЫХ СИСТЕМ синхронизации В РЕЖИМЕ ОТСЛЕЖИВАНИЯ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ

Рассмотрены системы фазовой синхронизации радиотехнических устройств техники связи. Изложены результаты теоретических исследований по разработке, анализу и совершенствованию известных и синтез новых схем синхронизации, характеризующихся высокой помехоустойчивостью, точностью и быстродействием при простоте конструкции. На основе инвариантного подхода предложена модель комбинированной системы синхронизации с разомкнутой связью, которая имеет низкий уровень постоянных динамических погрешностей благодаря повышению порядка астатизма; решена задача синтеза разомкнутой связи в комбинированной системе синхронизации при условии обеспечения инвариантности и повышения порядка астатизма при слежении за несущей частотой, которая уменьшает постоянные динамические погрешности системы; предложены аналитические соотношения и на их основе методика, которая позволяет определить вид и параметры разомкнутой связи в комбинированной системе синхронизации при условии обеспечения инвариантности и повышения порядка астатизма системы до требуемого значения. Благодаря полученным результатам пришли к таким выводам: ввод в разомкнутый канал комбинированной системы синхронизации физически реализуемых звеньев позволяет синтезировать инвариантные системы с повышенным порядком астатизма; применение в качестве разомкнутой связи частотного дискриминатора дает повышение порядка астатизма комбинированной системы синхронизации системы до второго порядка. Разомкнутый канал, выполненный в виде параллельного (последовательного) включения двух звеньев частотного дискриминатора с предложенной в работе передаточной функцией, позволяет повысить порядок астатизма до третьего и высшего порядка и не влияет на устойчивость системы.

Ключевые слова: синхронизация несущей частоты; комбинированная система синхронизации; инвариантность системы синхронизации; синтез разомкнутой связи; порядок астатизма.

L. Berkman, A. Turovskiy, A. Zakharzhevskiy

INVARIANT APPROACH TO REDUCTION OF CONSTANT DYNAMIC ERRORS OF PHASE SYNCHRONIZATION SYSTEMS IN CARRIER FREQUENCY TRACKING MODE

Successful solution to the problem of further improving the efficiency of communication systems largely depends on the quality of functioning of the systems and devices that are part of them. Phase synchronization systems are widely implemented in various radio engineering devices of communication technology, radar and control, as well as in the device of exact magnetic recording. In particular, in phase-coherent telecommunication and control systems, they are used for carrier and clock frequency recovery and for coherent demodulation of analog and digital signals with angular modulation. In the article: based on the invariant approach, a model of a combined synchronization system with open communication is proposed, which has a low level of constant dynamic errors due to the increase of the order of astatism; solved the problem of synthesis of open communication in the combined synchronization system under the condition of ensuring invariance and increasing the order of astatism when monitoring the carrier frequency which reduces the constant dynamic errors of the system; analytical relations and on their basis a technique which allows to define a kind and parameters of open communication in the combined system of synchronization on condition of maintenance of invariance and increase of an order of astatism of system to necessary value are offered. The obtained results substantiated the following conclusions. Introduction to the open channel of the combined system of synchronization of physically realized links, allows to synthesize invariant systems with the increased order of astatism. The use as an open link frequency discriminator, allows to increase the order of astatism of the combined system synchronization system to the second order. The open channel is made in the form of parallel (serial) connection of two links of the frequency discriminator with the proposed transfer function allows to increase the order of astatism to the third and higher order and does not affect the stability of the system.

Keywords: carrier frequency synchronization; combined synchronization system; invariance of synchronization system; synthesis of open communication; order of astatism.