

Туровський О.Л. Державний університет телекомунікацій, Київ

ПІДВИЩЕННЯ ПОРЯДКУ АСТАТИЗМУ ФАЗОВИХ СИСТЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ В РЕЖИМІ ВІДСТЕЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ В СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

Анотація: Успішне вирішення 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 управління а також в пристрої точного магнітного запису широко впроваджені системи фазової синхронізації. Зокрема, в фазокогерентних системах телекомунікації і управління вони застосовуються для відновлення несучої і тактовою частот та для когерентної демодуляції аналогових і цифрових сигналів з кутовою модуляцією

В статті розглядаються системи фазової синхронізації радіотехнічних пристроїв техніки зв'язку. А саме, викладені результати теоретичних досліджень в напрямку розробки, аналізу та удосконалення відомих і синтез нових схем синхронізації, що характеризуються високою завадостійкістю, точністю і швидкодією при простоті конструкції. В статті: запропонована модель комбінованої системи синхронізації з розімкнутого зв'язком; вирішено завдання синтезу розімкненого зв'язку в комбінованій системі синхронізації при умові підвищення порядку астатизму при стеженні за несучою частотою (пілот - сигналом), фаза якої модульована детермінованим доплерівським сигналом; запропоновано аналітичні співвідношення та на їх основі методу, яка дозволяє визначити вид і параметри розімкнутої зв'язку в комбінованій системі синхронізації при умові підвищення порядку астатизму системи до необхідного значення. Отримані результати обґрунтували наступні висновки. Введення в розімкнутий канал комбінованої системи синхронізації фізично реалізованих ланок, дозволяє підвищити порядок астатизму системи і синтезувати інваріантні системи. Застосування в якості розімкнутого зв'язку частотного дискримінатора, дозволяє підвищити порядок астатизму комбінованої системи синхронізації системи до другого порядку. Розімкнутий канал виконаний у вигляді паралельного (послідовного) включення двох ланок частотного дискримінатора з запропонованою в роботі передавальною функцією дозволяє підвищити порядок астатизму до третього та вище порядку та не впливає на стійкість системи.

Ключові слова. синхронізація несучої частоти, замкнута система синхронізації, комбінована система синхронізації, синтез розімкнутого зв'язку, порядок астатизму.

Turovsky O.L. State University of Telecommunications, Kyiv

INCREASING THE ORDER OF ASTATISM OF PHASE SYNCHRONIZATION SYSTEMS IN CARRIER FREQUENCY TRACKING MODE IN SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

Abstract. 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 the systems of phase synchronization of radio engineering devices of communication technology are considered. In particular, the results of theoretical researches in the direction of development, analysis and improvement of known and synthesis of new synchronization circuits, characterized by high noise immunity, accuracy and speed with simplicity of design, are presented.

In the article: the proposed model of the combined system of disconnection is broken; the problem of synthesis of open communication in the combined system of synchronization is solved with the condition of increasing the order of astatism at tracking the carrier frequency (pilot - signal), the phase of which is modulated by a deterministic Doppler signal; Analytical ratios and on their basis are offered a method that allows to determine the type and parameters of open communication in the combined system of

synchronization, provided that the order of astatism of the system is increased to the required value.

The obtained results substantiated the following conclusions. Introduction to the open channel of the combined system of synchronization of physically realized units, allows to increase the order of astatism of the system and to synthesize invariant systems. The use of a frequency discriminator as an open link allows to increase the order of astatism of the combined system of synchronization of the system to the second order. The open channel is made in the form of parallel (sequential) inclusion 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, closed-loop synchronization, combined synchronization system, disconnect synthesis, astatism order.

Туровский А.Л. Государственный университет телекоммуникаций, Киев

ПОВЫШЕНИЕ ПОРЯДКА АСТАТИЗМА ФАЗОВЫХ СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ В РЕЖИМЕ СЛЕЖЕНИЯ ЗА НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТОЙ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Аннотация: Успешное решение задачи дальнейшего повышения эффективности систем связи во многом зависит от качества функционирования систем и устройств, входящих в их состав. В разные радиотехнические устройства техники связи, радиолокации и управления, а также в устройстве точной магнитной записи широко внедрены системы фазовой синхронизации. В частности, в фазокогерентных системах связи и управления они применяются для восстановления несущей и тактовой частот и для когерентной демодуляции аналоговых и цифровых сигналов с угловой модуляцией

В статье рассматриваются системы фазовой синхронизации радиотехнических устройств техники связи. В частности, изложены результаты теоретических исследований в направлении разработки, анализа и совершенствования известных и синтез новых схем синхронизации, характеризующихся высокой помехоустойчивостью, точностью и быстродействием при простоте конструкции. В статье: предложена модель комбинированной системы синхронизации с разомкнутой связью; решена задача синтеза разомкнутой связи в комбинированной системе синхронизации при условии повышения порядка астатизма при слежке за несущей частотой (пилот - сигналом), фаза которой модулированная детерминированным доплеровским сигналом; предложено аналитические соотношения и на их основе методика, которая позволяет определить вид и параметры разомкнутой связи в комбинированной системе синхронизации при условии повышения порядка астатизма системы до требуемого значения. Полученные результаты обосновали следующие выводы. Введение в разомкнут канал комбинированной системы синхронизации физически реализуемых звеньев, позволяет повысить порядок астатизма системы и синтезировать инвариантные системы. Применение в качестве разомкнутой связи частотного дискриминатора, позволяет повысить порядок астатизма комбинированной системы синхронизации системы до второго порядка. Разомкнут канал выполнен в виде параллельного (последовательного) включения двух звеньев частотного дискриминатора с предложенной в работе передаточной функцией позволяет повысить порядок астатизма к третьему и выше порядку и не влияет на устойчивость системы.

Ключевые слова: синхронизация несущей частоты, замкнутая система синхронизации, комбинированная система синхронизации, синтез разомкнутой связи, порядок астатизма.

1. Вступ

Вирішення 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 управління а також в пристрої точного магнітного запису широко впроваджені системи фазової синхронізації. Зокрема, в фазокогерентних системах телекомунікації і управління вони застосовуються для відновлення несучої і тактовою частот та для когерентної демодуляції аналогових і цифрових сигналів з кутовою модуляцією [1].

Робота систем синхронізації характеризується впливом ряду збурень та шумів на їх роботу. А саме адитивного флуктуаційного шуму, збурення корисної кутової модуляції (в

разі фільтрації несучої частоти), стрибків фази і частоти та інших. У ряді випадків необхідно забезпечити високу точність роботи системи в сталому і перехідному режимах. Так, наприклад, в лініях космічного зв'язку основними збуреннями є адитивний гауссовський шум і доплерівські зміщення частоти. Тому системи синхронізації, що працюють в таких умовах, повинні характеризуватися малою дисперсією фазової помилки і високою швидкодією [2].

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

У наукових роботах, наприклад [3, 4, 5], описані дослідження, спрямовані в основному на оптимізацію параметрів фільтра і системи в цілому для класу замкнених систем синхронізації (ЗСС). Однак ЗСС через властивих їм протиріч не дозволяють в ряді випадків забезпечити необхідну якість роботи. Це особливо відчутно, коли потрібно поліпшити якість системи по двом і більше суперечливим показникам. Проведений аналіз ЗСС показав, що при обліку адитивного гаусівського шуму і нестабільності генераторів, прагнення мінімізувати дисперсію фазової помилки в класі ЗСС викликає погіршення динаміки системи та не дозволяє збільшити порядок астатизму.

Великі можливості щодо поліпшення якості систем синхронізації є в класі комбінованих систем синхронізації (КСС), які можуть поєднувати принципи регулювання по відхиленню і збуренню, що визначалось в якості перспективних методів в роботах [1, 6]. Однак можливості КСС різного типу на сьогоднішній день мало досліджені.

2. Аналіз досліджень і публікацій.

В більшості робіт по КСС, наприклад [7, 8, 9], в основному проводиться аналіз їх динаміки при простому розімкнутому зв'язку, що складається з частотного дискримінатора (ЧД) і різних фільтрів (або без них), без урахування шуму.

На відміну від простих систем синхронізації замкнутого типу з включення частотного дискримінатора, перспективна комбінована система автоматичного фазової синхронізації, в якій пропонується синтез розімкнутої зв'язку при умові підвищення порядку астатизму має свої особливості, зумовлені специфічними вхідними вузлами замкнутого і розімкнутого каналів управління [10].

Певні дослідження в напрямку поліпшення якостей ЗСС через зміну схеми реалізації в напрямку її комбінування та зменшення різними методами мінімальних помилок на етапі фільтрації фази проводились і їх результати викладені в наступних роботах

У роботі [9] показано особливості реалізації системи відновлення несучої частоти при когерентної демодуляції сигналу з безперервною фазою. Досліджується питання практичної реалізації системи фазового автопідстроювання частоти на сучасній елементній базі. В статті відсутній розгляд питання синтезу розімкнутого зв'язку в схемі розглянутої в якості оптимальної схеми. Також в даній статті не розглядаються питання підвищення порядку астатизму.

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

Автор роботи [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 при формуванні сигналів квадратурних каналів: синфазних канал використовується для формування фазоманіпульованого сигналу з розширенням спектра, квадратурний канал використовується для передачі сигналу тактової частоти.

В даній роботі не розглядався вид схеми стеження, до якої вказаний алгоритм можна застосувати та не розглянуто питання підвищення порядку астатизму для даного алгоритму.

В роботі [13] подана нова схема модуляції прямої послідовності для систем зв'язку по розподіленому спектру, визначена як модуляція затримки і адресування (DADS). Запропонований авторами схема проста в реалізації і не потребує вирівнювання коду вхідного сигналу на її вході, що робить її найбільш оптимальною для передачі коротких сигналів. В статті не розкрито тип схеми, відносно якої обґрунтовувались виводи, а також відсутній розгляд питання можливого синтезу розімкнутого зв'язку в такій схемі, та відсутнє питання підвищення порядку астатизму в визначеній схемі.

Автори роботи [14] пропонують спільну оцінку синхронізації та зсуву несучої та виявлення даних за допомогою фільтра сигналів, ранжованих по важливості в каналах адитивного білого гауссового шуму. В даній роботі отримано зважений байєсівський Крамерський Рао–кордон (WBCRB) для спільного визначення часу та зсуву несучої, який враховує попередній розподіл параметрів оцінки та є точною нижньою межею для всіх розглянутих значень співвідношення сигнал / шум (SNR). Питання, пов'язані з типом схеми, на якій пропонується реалізувати запропоновану оцінку та не розглянуті питання підвищення порядку астатизму в визначеній схемі

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

В роботі [16] запропоновано метод виділення 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 одержаних даних. Використовується в системах радіомоніторингу, які здійснюють радіочастотний контроль. Схема, на якій можлива реалізація запропонованого підходу в роботі не розглядається.

3. Мета дослідження.

Таким чином, завдання синтезу більш складних зв'язків в КСС зі змінною структурою та з логічними пристроями, що дозволяють підвищити порядок астатизму системи, зменшити дисперсію постійної і перехідної помилок в процесі відстеження несучої частоти в умовах наявності шумів в каналі зв'язку на даний час не вирішувалися та є актуальною науковою задачею, розв'язанню якої присвячена дана робота.

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

В даній роботі розглянемо рішення цих задач в класі КСС, вільних від зазначених протиріч.

4. Результати досліджень.

Визначимо математичну модель системи синхронізації для когерентної 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, при проектуванні систем зв'язку враховуються в основному шуми Галактики, які носять характер білого гаусівського шуму [2].

Виходячи з цього, в подальшому будемо розглядати адитивний гаусівський шум, з врахуванням додаткової кутової модуляції за рахунок доплерівських відходів частоти.

Вхідний і вихідний сигнали системи синхронізації запишемо, відповідно, у 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 в каналі з односторонньою спектральною щільністю $N_0/2$.

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

Розімкнутий канал КСС будемо синтезувати на базі частотного дискримінатора (ЧД) (або послідовного з'єднання декількох ланок, з аналогічними передавальними функціями перше з яких - ЧД).

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

Крім того, при переході до математичної моделі необхідно врахувати відповідні перетворення фази і частоти за рахунок дії шуму і реакцію реальних ФД і ЧД на суму сигналу і шуму (1).

Так, під час подання на ФД з синусоїдальної характеристикою сигналів виду (1), напруга на його виході буде [6]:

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

де $K_{\text{ФД}}$ – коефіцієнт передачі ФД

N_{φ} – еквівалентний фазовий шум, причому $N_{\varphi} = N_C \cos \varphi + N_S \sin \varphi$;

N_C і N_S – косинусоїдальна і синусоїдальна складова адитивного білого шуму $n(t)$, що пройшов через виборчі ланки приймача; $\varphi = \varphi_{\text{вх}}(t) - \varphi_{\text{вих}}(t)$.

Оскільки в даній роботі синтезуються системи синхронізації високої точності, то будемо вважати, що величина фазової помилки (або її дисперсія) задовольняють умовам малості [6], що дозволяє розглядати лінійну модель.

У даній роботі розглянемо саме особливості синтезу розімкнутого зв'язку з умови підвищення порядку астатизму і мінімізації дисперсії фазової помилки під час стеження за несучою частотою.

Структурна схема лінійної моделі системи синхронізації КСС, зображена на рис. 1. До складу вказаної лінійної моделі системи синхронізації входить додаткова ланка з передавальною функцією $W_4(s)$, за допомогою якої здійснено розімкнений зв'язок та утворено розімкнутий канал управління.

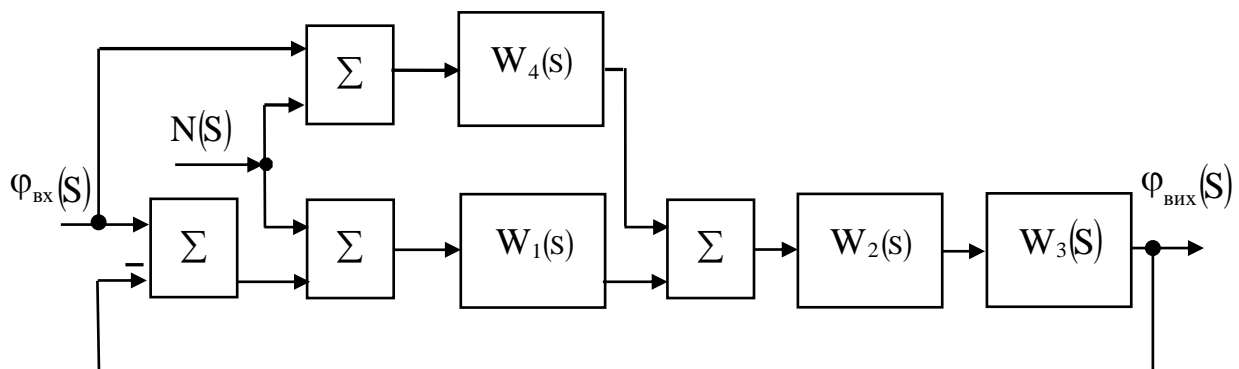


Рис. 1. Структурна схема лінійної моделі КСС з додатковою ланкою.

Користуючись вище запропонованою моделлю КСС, вирішимо завдання синтезу розімкненого зв'язку з умови підвищення порядку астатизму, при стеженні за несучою частотою (пілот - сигналом), фаза якої модульована детермінованим доплерівським сигналом, а впливом шуму можна знехтувати. Таке завдання виникає, наприклад, в апаратурі багатостанційного доступу, коли опорна станція супутникового зв'язку передає сигнал синхронізації (кодове слово), а усі інші станції на цьому інтервалі передають сигнали з не модульованими несучими.

Якщо ретранслятор встановлений на штучному супутнику зв'язку з низькою орбітою, то основна похибка у відстежуванні фази буде обумовлена доплерівськими відхиленнями частоти. Так, при висоті орбіти ШСЗ 2000 км нестабільність частоти за рахунок доплерівського зміщення складає $V_d = 7 \times 10^{-5}$ [2].

Якщо нестабільність генераторів забезпечити порядку $V_\Gamma = 10^{-6}$ і несуча частота дорівнює 10 ГГц, то відхилення частоти за рахунок доплерівського ефекту і нестабільностей генератора відповідно складуть $\Delta f_d = 7$ МГц, $\Delta f_\Gamma = 0,1$ МГц.

Так, при передачі телевізійного ЧМ сигналу з шириною смуги $\Delta F = 60$ МГц, нестабільності генераторів практично не впливають на завадостійкість ($\Delta f_\Gamma \ll \Delta F$) і їх можна не враховувати [2,6].

Розглянемо КСС з розімкненим зв'язком при умові підвищення порядку астатизму. Структурна схема комбінованої системи синхронізації КСС зображена на рис. 1, $W_4(S)$ – передавальна функція ланки, що синтезується.

У відповідності до схеми запишемо рівняння динаміки КСС:

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

Якщо виключити проміжні змінні, отримаємо рівняння динаміки КСС щодо помилки:

$$[1 + W_1(S)W_2(S)W_3(S)]\Phi(S) = [1 - W_3(S)W_4(S)]\Phi(S), \quad (2)$$

звідки випливає умова абсолютної інваріантності [18]:

$$1 - W_3(S)W_4(S) = 0.$$

З огляду на те, що $W_i(S) = D_i(S)/F_i(S)$, перепишемо рівність (2) наступним чином:

$$\begin{aligned} [F_1(S)F_2(S)F_3(S) + D_1(S)D_2(S)D_3(S)]F_4(S)\Phi(S) = \\ = [F_3(S)F_4(S) - D_3(S)D_4(S)]F_1(S)F_2(S)\Phi_{\text{вх}}(S) \end{aligned} \quad (3)$$

З цього виразу видно, що знаменник передавальної функції розімкнутого каналу $F_4(S)$ входить в 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 [18].

Наявність різниці в правій частині рівняння динаміки КСС (3) дозволяє за рахунок відповідного вибору поліномів $D_4(S)F_4(S)$ впливати як на сталу, так і на перехідну складові помилки [18].

З виразу (3) видно, що для досягнення абсолютної інваріантності в системі, передавальна функція розімкнутого каналу повинна мати наступний вигляд:

$$W_4(S) = 1/W_3(S) = F_3(S)/D_3(S) = D_4(S)/F_4(S). \quad (4)$$

Звідси випливає, що порядок полінома $D_4(S)$ повинен бути вище порядку полінома $F_4(S)$, що неможливо з 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 розімкнутий канал системи фізично реалізованих ланок $W_4(S)$, дозволяє підвищити порядок астатизму системи і синтезувати ε – інваріантні системи [18].

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

Запишемо в загальному вигляді передавальну функцію фізично реалізованого розімкнутого зв'язку:

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

Порядок астатизму системи ν визначається ступенем оператора S , що є загальним множником чисельника передавальної функції по помилці [18].

Передавальна функція по помилці КСС відповідно до рівняння (4):

$$W_{\varphi K}(S) = \frac{[F_3(S)F_4(S) - D_3(S)D_4(S)]F_1(S)F_2(S)}{[F_1(S)F_2(S)F_3(S) + D_1(S)D_2(S)D_3(S)]F_4(S)} = \frac{D_{\varphi K0}(S)S^{\nu_K}}{F_K(S)}. \quad (6)$$

Підставивши в вираз (6) вираз (5) і заклавши вимогу, щоб система мала астатизм порядку $\nu_K=1$, отримаємо вираз для чисельника передавальної функції, яка визначається виразом (6):

$$D_{\varphi K}(S) = \left[F_3(S) \sum_{j=0}^m T_{4j} S^j - D_3(S) \sum_{i=0}^n K_{4i} S^i \right] F_1(S) = D_{\varphi K0}(S) S^1. \quad (7)$$

Завдання зводиться до вибору коефіцієнтів K_{4i} і T_{4j} передавальної функції розімкнутого каналу таким чином, щоб поліном $D_{\varphi K}(S)$ містив S^1 в якості загального множника.

Необхідно відзначити, що поліном $F_4(S)$ входить до характеристичного рівняння комбінованої системи синхронізації. Тому область зміни параметрів T_{4j} обмежена вимогами до якості перехідного процесу.

Якщо порядок вищої похідної вхідного сигналу r і потрібно усунути усталену помилку, то повинна виконуватись нерівність $\nu > r$.

Загальний вигляд передавальної функції $W_4(S)$ розімкнутого зв'язку, що задовольняє умові виразу (5) і забезпечує $\nu_K=1$ визначається виразом [18]:

$$W_4(S) = \left(\sum_{i=\nu_3}^n K_{4i} S^i \right) / \left(\sum_{j=0}^m T_{4j} S^j \right) = D_4(S) / F_4(S), \quad (8)$$

де ν_3 - порядок астатизму вихідної системи без зв'язку.

Зазвичай беруть $m = n$. Вища ступінь поліномів $D_4(S)$ і $F_4(S)$ буде $\nu_3 + \Delta\nu - 1 = m$

де $\Delta v = 1 - v_3$ – величина, на яку необхідно підвищити порядок астатизму.

Отже, $m = l - 1$.

Оскільки порядок астатизму вихідної системи $v_3 = 1$, то вираз (8) буде:

$$W_4(S) = \left(\sum_{i=1}^{l-1} K_{4i} S^i \right) / \left(\sum_{j=0}^{l-1} T_{4j} S^j \right) = D_4(S) / F_4(S). \quad (9)$$

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

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

З виразу (10) з урахуванням виразу (7) отримуємо:

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

Визначимо вид передавальної функції розімкнутого зв'язку для розглянутих вище випадків.

Порядок вищої похідної вхідного сигналу (1) $r = 1$. Необхідний порядок астатизму $l = 2$. Вид передавальної функції розімкнутої зв'язку відповідно до виразу (9):

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

Поліном (10) при цьому має вигляд:

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

При виконанні умови $K_{41} = T_{40} / K_3$ отримаємо $D_\phi k(S) = T_{41}S^2$, тобто застосування в якості розімкнутого зв'язку частотного дискримінатора дозволяє підвищити порядок астатизму системи до другого порядку.

При $r = 2$; $l = 3$, вид передавальної функції $W_4(S)$ буде:

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

З виразу (10) отримаємо $T_{40} - K_3 K_{41} = 0$, $T_{41} - K_3 K_{42}$ тоді $D_\phi k(S) = T_{42}S^2$, тобто отримаємо систему синхронізації з астатизмом третього порядку.

Розімкнутий канал з такою функцією передачі може бути виконаний у вигляді паралельного (послідовного) включення двох ланок з передавальною функцією виду (11).

Структурна схема комбінованої системи синхронізації КСС з розімкнутого каналом з включенням двох ланок, як варіант реалізації, зображена на рис. 2.

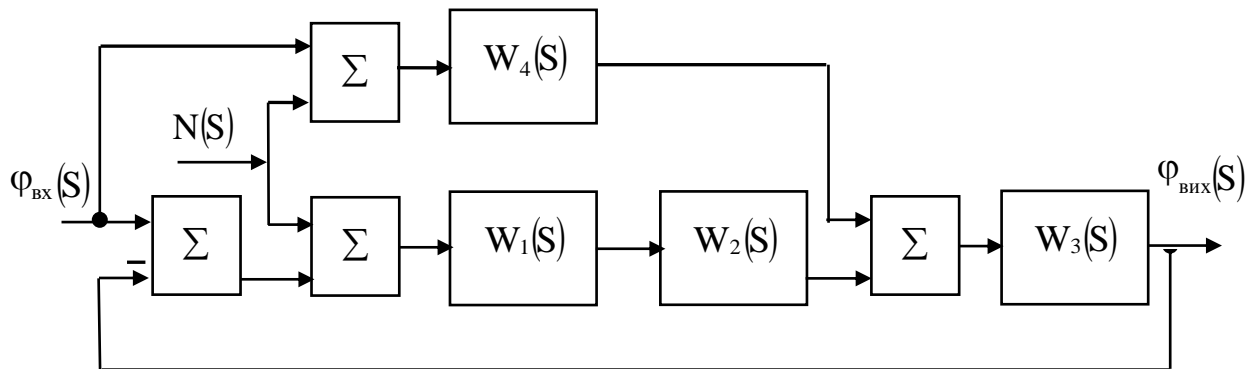


Рис. 2. Структурна схема лінійної моделі КСС з послідовним включенням додаткових ланок

6. Висновки.

В роботі розглянуті особливості синтезу КСС з умови підвищення точності роботи при використанні їх для стеження за несучою частотою (пілот-сигналом).

Одержано аналітичні співвідношення та розроблено методика яка дозволяє визначити вид і параметри розімкнутого зв'язку в комбінованій системі синхронізації при умові підвищення порядку астатизму системи до необхідного значення.

Аналіз результатів моделювання за допомогою запропонованих виразів показав, що ведення в розімкнутий канал комбінованої системи синхронізації фізично реалізованих ланок, дозволяє підвищити порядок астатизму системи і синтезувати інваріантні системи.

Застосування в якості розімкнутого зв'язку частотного дискримінатора, дозволяє підвищити порядок астатизму комбінованої системи синхронізації системи до другого порядку.

Розімкнутий канал виконаний у вигляді паралельного (послідовного) включення двох ланок частотного дискримінатора з запропонованою в роботі передавальною функцією дозволяє підвищити порядок астатизму до третього та вище порядку та не впливає на стійкість системи.

Запропоновано в роботі аналітичні вирази можуть стати основою методики синтезу КСС при умові підвищення точності в сталому режимі.

Вказана методика повинна враховувати кілька дестабілізуючих чинників, а саме: доплерівське зміщення; нестабільність генераторів; та адитивний шум з врахуванням особливостей роботи в цих умовах фазового і частотного дискримінаторів.

Подальшим напрямком досліджень є синтез розімкнутого зв'язку в комбінованих системах синхронізації на фоні адитивного гаусівського шуму при врахуванні фазової нестабільності генераторів.

Список використаної літератури

1. Шахтарин Б.И. Анализ систем синхронизации при наличии помех. 2-е изд., перераб. и доп. / Шахтарин Б.И. –Москва: Горячая линия – Телеком, 2016. –360 с.
2. Паршуткин А. В. Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех // Паршуткин А. В., Маслаков П. А. / Труды СПИИРАН. –2017. –4(53). –С. 159-177.
3. Бойко Ю. М. Оцінювання якісних показників пристроїв синхронізації сигналів засобів телекомунікацій // Ю. М. Бойко / Вісник Хмельницького національного університету. –2015. –№ 1. –С. 204–213.
4. Глухов А. В. Оптимизация параметров цифровых фильтров высокоскоростного модулятора для PLC-модем // А. В. Глухов / Вестник Тамбовского государственного технического университета. –2013. –Том 19, –№ 4. –С.751-756.
5. Lyons R.G. Understanding Digital Signal Processing / Lyons R.G. –Boston: Prentice Hall,

2010. –992 p.

6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е издание.:Пер. с английского / Скляр Б. –Москва:Издательский дом «Вильямс», 2003. –1099 с.

7. Бойко Ю.М. Проблеми синхронізації автоколивальних систем під зовнішнім періодичним впливом // Ю.М. Бойко, Поліщук А.С. / Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. –2010. –№2. –С. 156 - 162.

8. Бойко Ю. М. Аналіз моделей систем синхронізації у цифрових приймачах // Ю.М. Бойко, О.І. Єрьоменко / Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції. Одеська національна академія зв'язку ім. Попова. м. Одеса, 5–10 червня, 2015 р. –2015. –С. 192-194.

9. Кучер Д.Б., Макогон В.П. Відновлення несучої при когерентній демодуляції сигналу з безперервною фазою засобів зв'язку // Д.Б. Кучер, В.П. Макогон / Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. –2013. –№2(11). –С. 148-149.

10. Kay S. Accurate Single Frequency Estimator // S. Kay, A. Fast / IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing. –1989. –VOL. 37, –No 12. –P. 1987-1990.

11. Тихомиров А.В. Синхронизация в системах с прямым расширением спектра // А.В.Тихомиров, Е.В. Омелянчук, А.Ю. Семенова / Инженерный вестник Дона. –2019. –№9. –С.31-35.

12. Канатчиков А.А. Исследование возможностей построения системы тактовой синхронизации на базе автокорреляционного демодулятора для приема сигналов с минимальной частотной манипуляцией // А.А. Канатчиков, Г.В. Куликов / Научный вестник МГТУ ГА. Серия Радиофизика и радиотехника. – 2010. –№ 152. –С.11-15.

13. Scheers B. A Modified Direct-Sequence Spread Spectrum Modulation Scheme for Burst Transmissions // B. Scheers, V. Le Nir // Military Communications and Information Systems Conference (MCC'2010). Wroclaw, Poland, September 27–28, – 2010. –P.366–3673.

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

15. Нагорнюк О. А. Покращення точності оцінювання несучої та символної частоти сигналів з цифровою модуляцією // О. А. Нагорнюк / 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 // І. І. Пищак / Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Комп'ютерні системи та мережі. –2012. –№ 745. –С. 164–167.

17. Хоровиц П. Искусство схемотехники: в 3-х томах. Изд. 4-е, переработанное и дополненное. Пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – Москва: Мир, 1993.

18. Мисриханов М.Ш. Инвариантное управление многомерными системами / Мисриханов М.Ш. –Москва: Энерготомиздат, 2003. –236 с.

References

1. Shakhhtarin B.I. Analiz sistem sinkhronizatsii pri nalichii pomekh. 2-ye izd., pererab. i dop. / Shakhhtarin B.I. –Moskva: Goryachaya liniya – Telekom, 2016. –360 p.

2. Parshutkin A. V. Issledovaniye pomekhoustoychivosti sovremennykh standartov sputnikovoy svyazi k vozdeystviyu nestatsionarnykh pomekh // Parshutkin A.V., Maslakov P.A. / Trudy SPIIRAN. –2017. –4(53). –p. 159-177.

3. Boyko YU. M. Otsenka kachestvennykh pokazateley ustroystv sinkhronizatsii signalov sredstv telekommunikatsiy // YU. M. Boyko / Vestnik Khmel'nitskogo natsional'nogo universiteta. –2015. –№ 1. –p. 204-213.

4. Glukhov A. V. Optimizatsiya parametrov tsifrovyykh fil'trov vysokoskorostnogo

modulyatora dlya PLC-modemov // A. V. Glukhov / Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. –2013. –Tom 19, –№ 4. –p.751-756.

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

6. Sklyar B. Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye. 2-ye izdaniye.:Per. s angliyskogo / B.Sklyar –Moskva:Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2003. –1099 p.

7. Boyko YU. Problemy sinkhronizatsii avtokolebatel'nykh sistem pod vneshnim periodicheskim vozdeystviyem // YU.M. Boyko, Polishchuk A.S. / Vestnik Khmel'nitskogo natsional'nogo universiteta. Tekhnicheskoye nauki. 2010. –№2. –p. 156 - 162.

8. Boyko YU. M. Analiz modeley sistem sinkhronizatsii tsifrovyykh priyemnikakh // YU.M. Boyko, A.I. Yeremenko / Materialy XIV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Odesskoye natsional'naya akademiya svyazi im. Popova. m. Odessa, 5-10 iyunya, 2015 -2015. –p. 192-194.

9. Kucher D.B., Makogon V.P. Vosstanovleniye nesushchey pri kogerentnoy demodulyatsii signala s nepreryvnoy fazoy sredstv svyazi // D.B. Kucher, V.P. Makogon / Nauka i tekhnika Vozdushnykh Sil Vooruzhennykh Sil Ukrainy. –2013. –№ 2 (11). –p. 148-149

10. Kay S. Accurate Single Frequency Estimator // S. Kay, A. Fast / IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing. –1989. –VOL. 37, –№ 12. –P. 1987-1990.

11. Tikhomirov A.V. Sinkhronizatsiya v sistemakh s pryamym rasshireniyem spektra // A.V.Tikhomirov, Ye.V. Omel'yanchuk, A.YU. Semenova / Inzhenernyy vestnik Dona. –2019. –№9. –p.31-35.

12. Kanatchikov A.A. Issledovaniye vozmozhnostey postroyeniya sistemy taktovoy sinkhronizatsii na baze avtokorrelyatsionnogo demodulyatora dlya priyema signalov s minimal'noy chastotnoy manipulyatsiyey // A.A. Kanatchikov, G.V. Kulikov / Nauchnyy vestnik MGTU GA. Seriya Radiofizika i radiotekhnika. – 2010. –№ 152. –S.11-15.

13. Scheers B. A Modified Direct-Sequence Spread Spectrum Modulation Scheme for Burst Transmissions // B. Scheers, V. Le Nir // Military Communications and Information Systems Conference (MCC'2010). Wroclaw, Poland, September 27–28, – 2010. –P.366–3673.

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

15. Nagornyuk A. A. Uluchsheniye tochnosti otsenki nesushchey i simvol'noy chastoty signalov s tsifrovoy modulyatsiyey // A. A. Nagornyuk / Problemy sozdaniya, ispytaniya, primeneniya i ekspluatatsii slozhnykh informatsionnykh sistem: Sb. nauk. rabot ZHVI NAU. – 2013. –Vyp. 8. –p. 62-70.

16. Pishchak I. I. Metod vyyavleniya chastot v efire radiosignala // I. Pishchak / Vestnik Natsional'nogo universiteta "L'vovskaya politekhnika" Komp'yuternyye sistemy i seti. –2012. –№ 745. –p. 164-167.

17. Khorovits P. Iskusstvo skhemotekhniki: v 3-kh tomakh. Izd. 4-ye, pererabotannoye i dopolnennoye. Per. s angl. / P. Khorovits, U. Khill. – Moskva: Mir, 1993.

18. Misrikhanov M.SH. Invariantnoye upravleniye mnogomernymi sistemami / Misrikhanov M.SH. –Moskva: Energotomizdat, 2003. –236 p.