

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ РАДІОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ В ХОДІ СТЕЖЕННЯ ЗА НЕСУЧОЮ ЧАСТОТОЮ

В роботі розглянуті питання підвищення ефективності системи фазової синхронізації фазокогерентних систем телекомунікації і управління в радіотехнічних пристроях. А саме, подано результати синтезу та аналізу схеми побудови комбінованої системи фазової синхронізації при умові зменшення сталих динамічних похибок в ході стеження за несучою частотою, фаза якої модульована детермінованим доплерівським сигналом. В результаті досліджень встановлено, що синтез розімкнутого каналу в комбінованих системах синхронізації дозволяє реалізувати їх по інваріантним схемам, які забезпечують зменшення сталих динамічних похибок шляхом підвищення порядку астатизму. 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. Проведений в роботі аналіз запропонованих схем показав, що впливу на дисперсію фазової помилки системи синхронізації можна досягнути зміною параметрів ланки розірваного зв'язку схеми побудови вказаної системи.

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

TUROVSKY O.
State University of Telecommunications

EVALUATION OF POSSIBILITIES TO IMPROVE WORK EFFICIENCY SYSTEMS OF SYNCHRONIZATION OF A RADIO TECHNICAL DEVICE DURING CARRIER FREQUENCY TRACKING

The successful solution of the problem of further improving the efficiency of communication systems largely depends on the quality of operation of systems and devices that are part of them. Phase synchronization systems are widely implemented in various radio engineering devices of communication, radar and control technology, as well as in the device of precise magnetic recording. In particular, in phase-coherent telecommunications and control systems, they are used to restore the carrier and clock frequencies and for coherent demodulation of analog and digital signals with angular modulation.

The issues of increasing the efficiency of the phase synchronization system of phase-coherent telecommunication and control systems in radio engineering devices are considered in the work. Namely, the results of synthesis and analysis of the scheme of construction of the combined system of phase synchronization under the condition of reduction of constant dynamic errors during monitoring of the carrier frequency, the phase of which is modulated by a deterministic Doppler signal are presented. As a result of research it is established that the synthesis of the open channel in the combined synchronization systems allows to realize them on invariant schemes which provide reduction of constant dynamic errors by increase of the order of astatism. The use as an open communication 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. The analysis of the proposed schemes showed that the effect on the phase error dispersion of the synchronization system can be achieved by changing the parameters of the broken link of the scheme of construction of the specified system.

Keywords. carrier frequency synchronization, closed synchronization system, combined synchronization system, broken link synthesis, astatism order.

Вступ. Наукові дослідження проблем передачі даних, пошук шляхів і методів підвищення ефективності використання засобів зв'язку, є надзвичайно важливими для вирішення завданнями, що стоять перед сучасними системами зв'язку та телекомунікації.

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 [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 [2, 3]. 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.

Постановка задачі. Питання підвищення якості функціонування комбінованої системи фазової синхронізації (КСС) є постійними важливими науковими завданнями і в ряді досліджень вирішуються методом створення відповідних оптимальних схем їх побудови в напрямку мінімізації дисперсії фазової помилки та одночасно, забезпечення високої швидкодії. Вказані схеми вирішують питання мінімізації фазової помилки через розробку науково обґрунтованих оптимальних схем побудови, які функціонують на основі розроблених математичних моделей. Вказані математичні моделі, в свою чергу, повинні враховувати параметри всіх функціональних складових ланок і елементів вказаної схеми системи синхронізації. А кінцевою метою їх розробки є обґрунтування схеми побудови, яка може забезпечити малу дисперсію фазової помилки в ході стеження за несучою частотою при забезпеченні високої швидкодії вказаної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначене в роботі [4] наукове завдання та подані результати його вирішення показують, що одним з шляхів вирішення завдання по підвищенню ефективності роботи системи синхронізації в напрямку мінімізації дисперсії фазової помилки є удосконалення її схеми побудови. Подані в даній роботі результати дають змогу оцінити вплив значень дробового інтервалу інтерполяції інформаційно-управляючої системи на величину помилки пристрою синхронізації та провести оцінку помилки за констеляційною діаграмою, оцінити джитер за розкритом око-діаграми і зміну завадостійкості при фіксованому значенні ймовірності бітової помилки. Питання синтезу схеми побудови пристрою синхронізації в даній роботі не розглядалися.

У наукових роботах [3, 5, 6] описані дослідження, спрямовані в основному на оптимізацію параметрів фільтра і системи в цілому для класу замкнутих 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, 7]. Однак можливості КСС різного типу на сьогоднішній день мало досліджені.

У даній роботі розглядалися саме особливості синтезу розімкненого зв'язку при зменшенні сталих динамічних похибок і мінімізації дисперсії фазової помилки під час стеження за несучою частотою. Безпосередньо зменшення сталих динамічних похибок системи пов'язано з порядком її астатизму, тобто підвищення останнього приводить до зменшення вказаних похибок.

Таким чином, розробка науково обґрунтованої схеми побудови системи синхронізації та оцінка її можливості щодо мінімізації фазової помилки в ході стеження за несучою частотою є актуальною науковою задачею, рішення якої присвячена дана стаття.

Основна частина. Структурна схема лінійної моделі системи синхронізації КСС, яка розглядалась в роботі, зображена на рис. 1. До складу вказаної моделі КСС входить додаткова ланка з передавальною функцією, за допомогою якої здійснено розімкнений зв'язок та утворено розімкнутий канал управління [7].

Користуючись вище запропонованою моделлю КСС, вирішимо завдання підвищення ефективності її роботи шляхом 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. Розгляд та синтез КСС з розімкненим зв'язком проводився при умові підвищення порядку астатизму.

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

У відповідності до схеми рис. 1 запишемо рівняння динаміки КСС [6]:

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

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

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

звідки випливає умова абсолютної інваріантності [9]: $1 - W_3(S)W_4(S) = 0$.

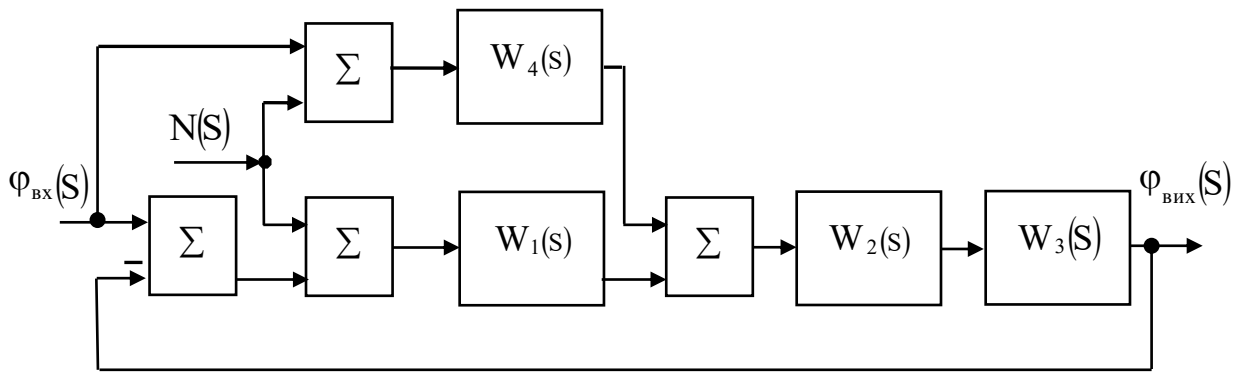


Рис. 1. Структурна схема лінійної моделі комбінованої системи синхронізації з додатковою ланкою

З огляду на те, що $W_i(s) = D_i(s)/F_i(s)$, перепишемо рівність (1) наступним чином:

$$\begin{aligned} [F_1(s)F_2(s)F_3(s) + D_1(s)D_2(s)D_3(s)]F_4(s)\varphi(s) = \\ = [F_3(s)F_4(s) - D_3(s)D_4(s)]F_1(s)F_2(s)\varphi_{\text{вх}}(s) \end{aligned} \quad (2)$$

З виразу (2) видно, що знаменник передавальної функції розімкнутого каналу $F_4(s)$ входить в характеристичне рівняння КСС (2) 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 [8].

Наявність різниці в правій частині рівняння динаміки КСС (2) дозволяє за рахунок відповідного вибору поліномів $D_4(s)F_4(s)$ впливати як на сталу, так і на перехідну складові помилки [7, 8].

З виразу (2) видно, що для досягнення абсолютної інваріантності в системі, передавальна функція розімкнутого каналу повинна мати наступний вигляд:

$$W_4(s) = 1/W_3(s) = F_3(s)/D_3(s) = D_4(s)/F_4(s) \quad (3)$$

Звідси випливає, що порядок полінома $D_4(s)$ повинен бути вище порядку полінома $F_4(s)$, що неможливо з умов фізичної реалізації [7,8].

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 \mathcal{E} – інваріантні системи [9].

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 [9].

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

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

Порядок астатизму системи V визначається ступенем оператора S , що є загальним множником чисельника передавальної функції по помилці [9].

Передавальна функція по помилці КСС відповідно до рівняння (2):

$$W_\varphi K(s) = \frac{[F_3(s)F_4(s) - D_3(s)D_4(s)]F_1(s)F_2(s)}{[F_1(s)F_2(s)F_3(s) + D_1(s)D_2(s)D_3(s)]F_4(s)} = \frac{D_{\varphi K0}(s)S^{v_K}}{F_K(s)}. \quad (5)$$

Підставивши в вираз (5) вираз (4) і заклавши вимогу, щоб система мала астатизм порядку $v_K=1$, отримаємо вираз для чисельника передавальної функції, яка визначається виразом:

$$D_{\Phi K}(S) = \left[F_3(S) \sum_{j=0}^m T_{4j} S^j - D_3(S) \sum_{i=0}^n K_{4i} S^i \right] F_1(S) = D_{\Phi K 0}(S) S^l. \quad (6)$$

Завдання зводиться до вибору коефіцієнтів K_{4i} і T_{4j} передавальної функції розімкнутого каналу таким чином, щоб поліном $D_{\Phi K}(S)$ містив S^l 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 $l > r$.

Загальний вигляд передавальної функції $W_4(S)$ розімкнутого зв'язку, що задовольняє умові виразу (4) і забезпечує $V_k = 1$ визначається виразом [9]:

$$W_4(S) = \left(\sum_{i=V_3}^n K_{4i} S^i \right) / \left(\sum_{j=0}^m T_{4j} S^j \right) = D_4(S) / F_4(S), \quad (7)$$

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 $V_3 + \Delta v - 1 = m$

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 (7) буде:

$$W_4(S) = \left(\sum_{i=1}^{l-1} K_{4i} S^i \right) / \left(\sum_{j=0}^{l-1} T_{4j} S^j \right) = D_4(S) / F_4(S). \quad (8)$$

Підставивши поліноми $D_4(S)$, $F_4(S)$ з (8) в (6) отримаємо

$$D_{\Phi K}(S) = (T_{40} - K_3 K_{41}) S + (T_{41} - K_3 K_{42}) S^2 + \dots + (T_{4(l-2)} - K_3 K_{4(l-1)}) S^{(l-1)} + (T_{4(l-1)}) S^l \quad (9)$$

З виразу (9) з урахуванням виразу (6) 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 $r = 1$. Необхідний порядок астатизму $l = 2$. Вид передавальної функції розімкнутої зв'язку відповідно до виразу (8):

$$W_4(S) = (K_{41} S) / (T_{41} S + T_{40}) \quad (10)$$

Поліном (9) 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.

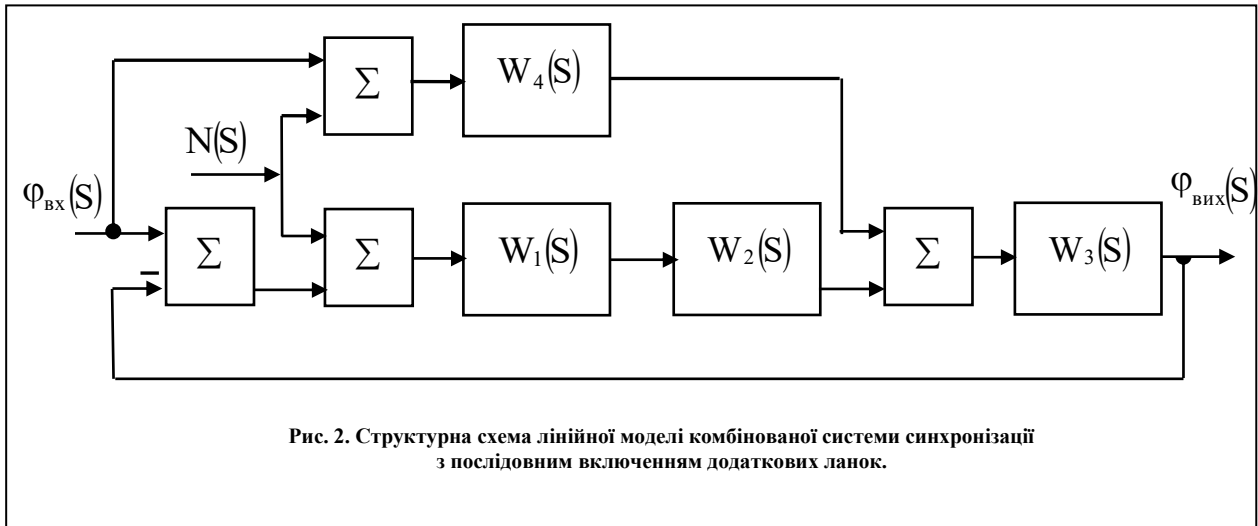
При $r = 2$; $l = 3$, вид передавальної функції $W_4(S)$ буде:

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

З виразу (9) 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 передавальної функцією виду (10).

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



Оцінка впливу ланки розімкнутого зв'язку комбінованої системи синхронізації на дисперсію фазової помилки під час стеження за несучою частотою

Певні результати впливу параметрів розімкнутого зв'язку КСС на відносну дисперсію фазової помилки $\eta = \delta_{\phi k}^2 / \delta_{\phi 3}^2 = f(K_4, T_4)$ системи фазової синхронізації подані залежностях рис. 3 [10, 11]

$$\eta = \sigma_{\phi n}^2 / \sigma_{\phi 3}^2$$

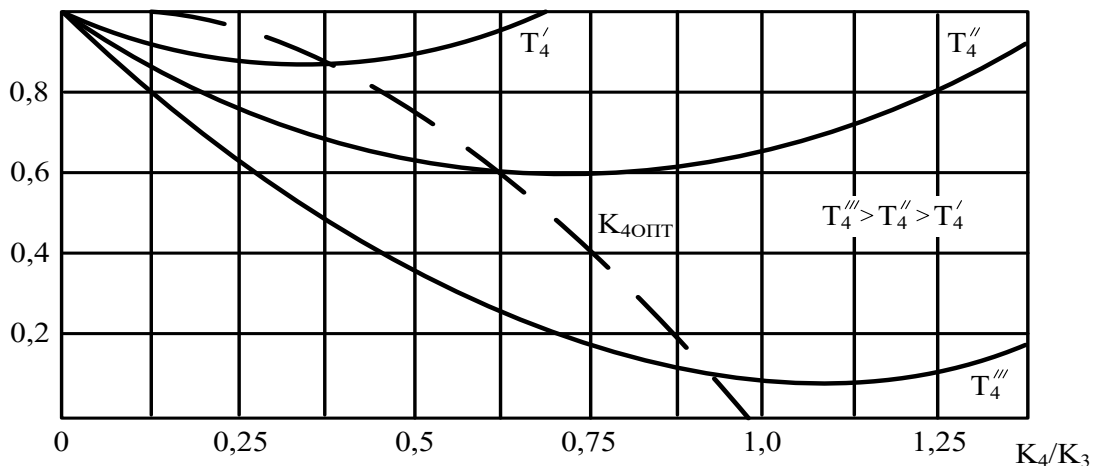


Рис. 3. Залежність дисперсії фазової помилки КСС від параметрів розімкнутого каналу

Їх аналіз показує, що збільшення параметра сталої часу T передавальної функції ланки розімкнутого зв'язку схеми синхронізації несучої частоти зменшує дисперсію фазової помилки $\delta_{\phi k}^2$ та викликає зміну оптимального параметра коефіцієнт підсилення фазового дискримінатора K .

Висновки. 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.

Впливу на дисперсію фазової помилки системи синхронізації можна досягнути зміною параметрів ланки розірваного зв'язку схеми синхронізації системи [12, 13].

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

Література

1. Шахтарин Б.И. Анализ систем синхронизации при наличии помех. 2-е изд., перераб. и доп. / Б.И. Шахтарин. –Москва: Горячая линия – Телеком, 2016. –360 с.
2. Mucchi L. Impact of synchronization errors and multiple access interference to the performance of UWB impulse radio systems / L. Mucchi, D. Marabissi, M. Ranaldi, E. Del Re and R. Fantacci // Eighth IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications - Programme and Book of Abstracts (IEEE Cat. No.04TH8738). -Sydney, NSW, Australia, 2004. –PP. 477-483.
3. Бойко Ю. М. Оцінювання якісних показників пристроїв синхронізації сигналів засобів телекомунікацій / Ю. М. Бойко // Вісник Хмельницького національного університету. –Хмельницький, 2015. –№ 1. –С. 204–213.
4. Бойко Ю. М. Синтез і аналіз інформаційно-управляючих систем синхронізації засобів телекомунікацій / Ю. М. Бойко // Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідом. науч.-техн. зб. Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". – Київ, 2017. – Вип. 1'(30). – С. 8–28.
5. Глухов А. В. Оптимизация параметров цифровых фильтров высокоскоростного модулятора для PLC-модем / А. В. Глухов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. –Тамбов, 2013. –Том 19, № 4. – С.751-756.
6. Lyons R.G. Understanding Digital Signal Processing / Lyons R.G. 2010. –Boston: Prentice Hall. – 992 p.
7. Scheers B., Le Nir V. 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. –PP.366–373.
8. Хоровиц П. Искусство схемотехники (в 3-х томах) / Хоровиц П., Хилл У. –М.: Мир, 1993.
9. Мисрихаиов М.Ш. Инвариантное управление многомерными системами / М.Ш. Мисрихаиов. –Москва: Энерготомиздат, 2003. – 236 с.
10. Marey M. Analysis of the Narrowband Interference Effect on OFDM Timing Synchronization / M. Marey, H. Steendam, // IEEE Transactions on Signal Processing. Sept. 2007. –Vol. 55, No. 9/ –PP. 4558-4566,
11. Turovsky O.L. Estimation of the possibilities of the combined synchronization system with open-link to minimize the dispersion of the phase error when tracking the carrier frequency under the conditions of the influence of additive noise/ O.L. Turovsky // Technology audit and production reserves. 2020. –Vol 3, No 4. –PP. 16-22. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.210242.
12. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and O. Barabash, "Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices," Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020. <https://doi.org/10.25046/aj050242>.
13. J. Boiko, O. Eromenko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Quality Assessment of Synchronization Devices in Telecommunication," in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019. <https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783438>.

References

1. Shakhhtar B.I. Analiz sistem sinkhronizatsii pri nalichii pomekh. 2-ye izd., pererab. i dop. / B.I. Shakhhtar. –Moskva: Goryachaya liniya – Telekom, 2016. –360 s.
2. Mucchi L. Impact of synchronization errors and multiple access interference to the performance of UWB impulse radio systems / L. Mucchi, D. Marabissi, M. Ranaldi, E. Del Re and R. Fantacci // Eighth IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications - Programme and Book of Abstracts (IEEE Cat. No.04TH8738). -Sydney, NSW, Australia, 2004. –PP. 477-483.
3. Boiko J. M. Otsynuvannya yakisnykh pokaznykh prystroyiv synkhronizatsiyi syhnaliv zasobiv telekomunikatsiy / Y. M. Boyko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. –Khmelnytsky, 2015. –№ 1. –S. 204–213.
4. Boiko J. M. Syntez i analiz informatsiyno-upravlyayuchykh system synkhronizatsiyi zasobiv telekomunikatsiy / Y. M. Boyko // Adaptivni systemy avtomatichnoho upravlinnya : mizhvidom. nauch.-tekh. zb. Nats. tekhn. un-t Ukrainy "Kyiv. politekhn. in-t im. Ihorya Sikorskoho". – Kyiv, 2017. – Vyp. 1 – (30). – S. 8–28.
5. Glukhov A. V. Optimizatsiya parametrov tsifrovyykh fil'trov vysokoskorostnogo modulyatora dlya PLC-modemov / A. V. Glukhov // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. –Tambov, 2013. –Tom 19, № 4. – S.751-756.
6. Lyons R.G. Understanding Digital Signal Processing / Lyons R.G. 2010. –Boston: Prentice Hall. – 992 p.
7. Scheers B., Le Nir V. 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. – PP. 366–373.
8. Khorovits P. Iskustvo skhemotekhniki (v 3-kh tomakh) / Khorovits P., Khill U. –М.: Mir, 1993.
9. Misrikhaiov M.S. Invariantnoye upravleniye mnogomernymi sistemami / M.S. Misrikhaiov. –Moskva: Energotomizdat, 2003. –236 s.
10. Marey M. Analysis of the Narrowband Interference Effect on OFDM Timing Synchronization / M. Marey, H. Steendam // IEEE Transactions on Signal Processing. Sept. 2007. –Vol. 55, No. 9/ –PP. 4558-4566,
11. Turovsky O.L. Estimation of the possibilities of the combined synchronization system with open-link to minimize the dispersion of the phase error when tracking the carrier frequency under the conditions of the influence of additive noise/ O.L. Turovsky // Technology audit and production reserves. 2020. –Vol 3, No 4. –PP. 16-22. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.210242.

12. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko and O. Barabash, "Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5(2), pp. 320-327, March 2020. <https://doi.org/10.25046/aj050242>.

13. J. Boiko, O. Eromenko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Quality Assessment of Synchronization Devices in Telecommunication," in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019. <https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783438>.

Надійшла / Paper received: 11.05.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020