

10.18372/2310-5461.48.15141

УДК 621.396

В. В. Козловський, д-р техн. наук, проф.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-8301-5501
e-mail: vvkzeos@gmail.com;

О. Л. Туровський, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-4961-0876
e-mail: s19641011@ukr.net;

В. Д. Кулінський, аспірант
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0001-4375-8602
e-mail: aa16vd@gmail.com

ОБРИС ПЕРСПЕКТИВНОЇ МОДЕЛІ ЛАНКИ РОЗІМКНУТОГО ЗВ'ЯЗКУ СИСТЕМИ ФАЗОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ СУЧАСНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Вступ

Ефективність застосування засобів сучасного радіозв'язку та подальшого підвищення ефективності систем зв'язку багато в чому залежить від якості функціонування систем і пристроїв, що входять до їх складу. Однією з важливих підсистем сучасних систем телекомунікацій є системи фазової синхронізації когерентних демодуляторів вхідного сигналу. В фазокогерентних системах телекомунікації і управління вказані системи застосовуються для відновлення несучої і тактовою частот та для когерентної демодуляції аналогових і цифрових сигналів з кутовою модуляцією [1; 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.

Великі можливості щодо поліпшення якості систем синхронізації є в класі комбінованих систем синхронізації (КСС), які можуть поєднувати принципи регулювання з відхилення і збурення, що визначалось в якості перспективних методів у працях [3; 4]. Очевидно, що ефективність КСС залежить від схеми її побудови та реалізованих

завдяки цій схемі можливостям щодо поліпшення роботи системи в цілому.

Одним з перспективних напрямків побудови схеми комбінованої фазової системи синхронізації є включення в її склад ланки розімкнутого зв'язку. Завдання вказаної ланки методом компенсуючого зворотного зв'язку по фазі та частоті вхідного сигналу — підвищити швидкодію системи при забезпеченні мінімізації фазової помилки. Основною вимогою до такої ланки є простота її конструкції та можливість моделювання на електронно-обчислювальній машині її роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових працях, присвячених підвищенню ефективності роботи систем фазової синхронізації та побудові схем їх функціонування достатньо широко висвітлені питання їх розбудови та оцінки роботи.

У працях [1; 5; 6] описані дослідження та методи, спрямовані переважно на оптимізацію параметрів фільтра і системи синхронізації в цілому для класу замкнутих систем синхронізації (ЗСС). Однак у цих роботах відсутній опис окремої схеми ланки розімкнутого зв'язку, та оцінка її можливості щодо впливу на ефективність роботи вказаних систем в ході оцінки несучої частоти.

У працях [7; 8] визначено, що ЗСС через власних 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. Наприклад, прагнення збільшити здатність до фільтрації системи синхронізації в класі ЗСС призводить до неминучого звуження смуги утримання, а прагнення підвищити порядок астатизму погіршує динаміку системи. Питання включення в дані схеми ланки розімкнутого зв'язку в даних роботах не розглянуто.

Великі можливості щодо поліпшення якості систем синхронізації є в класі комбінованих підсистем синхронізації, які можуть поєднувати принципи регулювання з відхилення і збурення, що визначалось як перспективні методи у працях [2; 3; 9]. Однак можливості ланки розімкнутого зв'язку та її схема побудови в даних роботах не висвітлено.

У таких наукових працях по КСС, як [10; 11] проводиться аналіз їх динаміки при простому розімкнутому зв'язку, що складається з частотного дискримінатора і різних фільтрів (або без них), без урахування шуму. Але у цих працях не проведено досліджень щодо розбудови схеми ланки розімкнутого зв'язку та відсутня математична модель її функціонування. Також не оцінені можливості щодо аналізу визначеної ланки за допомогою математичного моделювання на ЕОМ.

На відміну від простих КСС, перспективна комбінована підсистема синхронізації в якій пропонується синтез розімкнутої зв'язку за умови підвищення порядку астатизму має свої особливості, зумовлені специфічними вхідними вузлами замкнутого і розімкнутого каналів управління [12].

Постановка завдання

Формування обрису, визначення схеми побудови та розробка математичної моделі функціонування ланки розімкнутого зв'язку комбінованої схеми фазової синхронізації є актуальним науковим завданням, розв'язанню якого присвячена дана стаття.

Метою роботи є вибір типу схеми та синтез моделі ланки розімкнутого зв'язку системи фазової синхронізації несучої частоти за умови підвищення динаміки системи в перехідному режимі.

Кінцевим етапом синтезу моделі ланки розімкнутого зв'язку системи синхронізації несучої частоти є вирішення ряду завдань, а саме:

- вибір та обґрунтування типу схеми ланки розімкнутого зв'язку системи синхронізації несучої частоти;
- розробка науково обґрунтованих математичних залежностей та на їх основі моделі ланки розімкнутого зв'язку системи синхронізації не-

сучої частоти системи за умові забезпечення високої динаміки системи та порядку астатизму не менш другого при простоті схеми побудови;

- оцінка можливостей запропонованої схеми ланки розімкнутої системи синхронізації несучої частоти щодо моделювання на ЕОМ.

Виклад основного матеріалу

Основне завдання ланки компенсуючого зворотного зв'язку по фазі та частоті вхідного сигналу, це оцінка та порівняння фаз на вході ланки та фази опорного коливання і визначення їх різниці [1; 2].

Одними із пристроїв, що можуть здійснювати такі функції є стежачи демодулятори частотно-модульованих та фазо-модульованих сигналів. Висока завадозахищеність синхронно-фазових демодуляторів під час роботи в умовах слабких сигналів забезпечується тим, що в них фактично реалізується алгоритм роботи оптимальних приймачів за критерієм максимуму апостеріорної щільності розподілу ймовірності і найбільш повно реалізується апріорна інформація про передане повідомлення [1]. Від показників якості синхронно-фазових демодуляторів залежить достовірність переданої інформації від її джерела до її отримувача.

Необхідно відмітити, що однією з основних підсистем вищевказаних демодуляторів є системи фазової синхронізації, які в фазокогерентних системах телекомунікації і управління застосовуються для відновлення несучої і тактової частоти сигналу, що приймається та для когерентної демодуляції прийнятих системою аналогових і цифрових сигналів з кутовою модуляцією [1; 2].

Функціонування синхронно-фазових демодуляторів характеризується впливом збурень та шумів на їх роботу під час прийому сигналу. А саме — адитивного флуктуаційного шуму, збурення корисної кутової модуляції (в разі фільтрації несучої частоти), стрибків фази і частоти та ін.

У ряді випадків необхідно забезпечити високу точність роботи демодулятора, яка безпосередньо залежить від роботи його підсистеми синхронізації в сталому і перехідному режимах. А підсистеми синхронізації, що працюють в умовах впливу різних шумів та збурень, повинні характеризуватися малою дисперсією фазової помилки і високою швидкодією [3].

Синхронно-фазові демодулятори будуються за двома схемами. Це безперервні (аналогові) синхронно-фазові демодулятори та цифрові (дискретні) синхронно-фазові демодулятори [1; 2].

Як і в безперервних синхронно-фазових демодуляторах (САД), показник якості цифрових фазових автопідстроювачів частоти (ФАПЧ)

впливає на основні характеристики цифрових демодуляторів. Зазвичай цифрові СФД будуються таким чином, що частина вузлів виконано на елементах цифрової техніки: цифрові фазові дискримінатори, реверсні лічильники, генератори. В ряді випадків СФД повністю будуються на основі цифрових обчислювальних пристроїв (ЦОП). Застосування ЦОП при побудові СФД дозволяє спростити їх налаштування, підвищити надійність і технологічність конструкції, реалізувати складні алгоритми обробки сигналу [4].

Можливості застосування цифрових СФД залежать від розвитку цифрової обчислювальної техніки та мікропроцесорів. Швидке зростання цих напрямків приводить до того, що цифрові СФД успішно конкурують з аналоговими.

Якщо СФД виконаний з застосуванням цифрових та аналогових елементів, то такий СФД називають *аналогово-цифровим* СФД.

Актуальним є завдання підвищення точності та швидкодії аналогово-цифрових СФД. Одним з напрямків якої може бути синтез цифрового розімкнутого компенсаційного зв'язку безпосередньо в підсистемі синхронізації, а саме побудова ітераційних аналогово-цифрових СФД за умови, що основний та допоміжний контури їх систем синхронізації можуть бути як цифровими так і аналоговими.

Вирішення цього завдання безпосередньо пов'язано як з синтезом розірваного зв'язку в цифровому СФД так і з оцінкою можливостей такого СФД до реалізації отриманих в процесі синтезу розімкнутого зв'язку передаточних функцій в схемах побудови його системи синхронізації та можливостей до попереднього аналізу вказаних передаточних функцій на ЕОМ.

Необхідно відмітити, що робота СФД любого типа характеризується двома режимами: робота в сталому режимі та робота в перехідному режимі.

Очевидно оцінку можливостей синтезування розімкнутого зв'язку в підсистемі синхронізації СФД доцільно провести на основі аналізу передавальних функцій, які отримані для більш простого, сталого режиму роботи СФД.

Відомі два метода побудови структурної схеми цифрового СФД. Структурна схема СФД, що містить цифровий керований генератор (ЦКГ) включає вхідний аналого — цифровий перетворювач, цифровий фазовий демодулятор, цифровий фільтр, цифро-аналоговий перетворювач, фільтр низької частоти. Вихідні сигнали функціонально необхідних елементів є кодами, а сам цифровий СФД реалізується в вигляді спеціалізованого обчислювача чи програмним способом на управляючій ЕОМ (УЕОМ).

Основною перевагою такої схеми є висока стабільність характеристик ЦОП порівняно з аналоговим керованим генератором [1; 4].

Широке застосування отримала схема СФД, у якій вихідний сигнал аналогового фазового дискримінатора (ФД) перетворюється на цифровий код в аналогово-цифровому перетворювачі (АЦП), фільтрується в цифровому фільтрі нижніх частот (ЦФ), відновлюється в аналогову форму цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) і керує частотою вихідного коливання ЦУГ. УЕОМ здійснює програмне керування характеристиками цифрових вузлів (частотою дискретизації, числом рівнів квантування і законами перетворення в АЦП і ЦАП) на основі динаміки роботи СФД.

Такі характеристики СФД, як смуга захвату і утримання та стійкість, можуть значно погіршуватися через погрішності цифрової обробки порівняно з аналогічними характеристиками аналогового СФД. Якщо підібрати при мінімальному значенні числа рівнів квантування частоту дискретизації, то можливо побудувати цифровий СФД, порогові явища в якому проявляються приблизно при таких самих значеннях сигнал-шум на вході, що і для аналогового СФД [4; 13].

Комбінований спосіб побудови СФД дозволяє забезпечити високу точність роботи в сталих режимах. Цифрові стежачи демодулятори з комбінованим керуванням можна побудувати по одному з трьох варіантів: цифровий обчислювальний пристрій (ЦОП) використовується як в замкнутому так і в розімкнутому каналах керування; ЦОП застосовується в замкнутому контурі а розімкнутий канал безперервний; ЦОП застосовується в розімкнутому каналі керування [14; 15; 16].

Структурна схема цифрового СФД з комбінованим керуванням подана на рисунку [17].

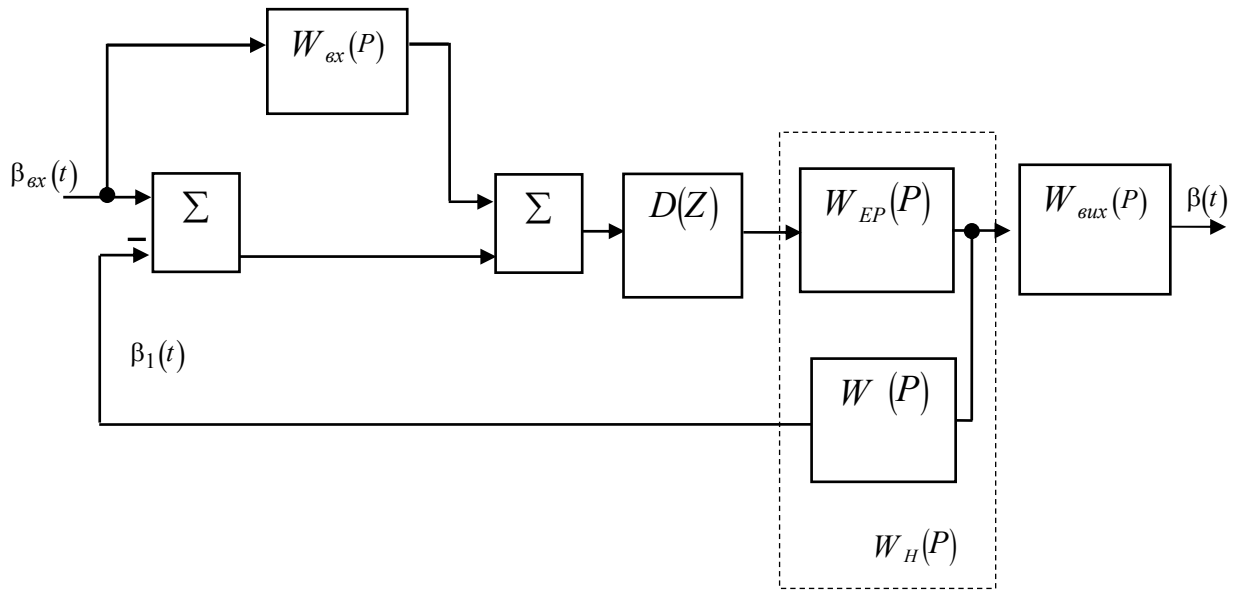
Точність роботи цифрового СФД, як будь якої системи автоматичного керування залежить від виду оператора безперервної частини СФД [16; 17]. Прийmemo які такий оператор такий [18; 19]:

$$W_H = \frac{K}{(T_P + 1)P} \quad (1)$$

Тобто, початковий СФД без розімкнутого каналу керування має порядок астатизму $\nu = 1$. Запишемо вираз (1) у вигляді [15; 19]:

$$W_H(j\lambda) = \frac{K}{(T\lambda + 1)j\lambda}; \quad \lambda = \frac{2}{T_b} \operatorname{tg} \frac{\omega T_b}{2},$$

де ω — частота вхідного сигналу; T_b — крок видачі сигналу ЦОП.



Структурна схема лінійної моделі комбінованого синхронно-фазового демодулятора

Абсолютна псевдо частота $\lambda = \frac{2}{T_b} \frac{W}{j}$,

де $W = \frac{Z-1}{z+1}$ — оператор Z перетворення [20].

Еквівалентну передавальну функцію цифрового комбінованого СФД у розімкнутому стані подамо в вигляді:

$$W_{EP}(j\lambda) = \frac{W(Z)}{1-W(Z)} = \frac{W(Z)[1+W_{\text{фвх}}(Z)]}{1-W(Z)W_{\text{фвх}}(Z)}.$$

Прийнявши $W_{\text{вх}}(j\lambda) = a j\lambda$ отримаємо

$$W_{EP}(j\lambda) = \left[K(1+a j\lambda) \right] / \left[T(j\lambda)^2 + j\lambda - K a j\lambda \right]$$

$$\text{Якщо } a = 1//K \text{ маємо } W_{EP}(j\lambda) = \frac{K(1+a j\lambda)}{T(j\lambda)^2}.$$

Така передавальна функція відповідає СФД з порядком астатизму рівним 2 [17; 20].

Для визначення $W_{\text{вх}}(Z)$ перейдемо від $a j\lambda$ до Z відображенню.

$$W_{\text{фвх}}(Z) \frac{2a}{T_p} \frac{Z-1}{Z+1} = \frac{q_0 - q_1 Z - 1}{a_0 + a_1 Z - 1}, \quad (2)$$

де $q_0 = q_1 = 2a/T_0$; $a_0 = a_1 = 1$.

Реалізація передавальної функції вигляду (2) достатньо добре здійснюється на мікропроцесорах ЕОМ [21].

Таким чином, цифровий комбінований СФД можна синтезувати за умови підвищення точності в сталих режимах як безперервну комбіновану систему відповідно з обраними критеріями.

Оцінимо можливість аналізу цифрових СФД на ЕОМ. На відміну від неперервних систем

динаміка цифрових систем описується не диференціальними а різницевиими рівняннями. Оскільки складові векторів $\vec{v}(t)$, $\vec{x}(t)$, $\vec{y}(t)$ змінюються не безперервно в часі, а тільки в дискретні моменти часу.

Різницеве рівняння, що описує динаміку цифрової системи, має вигляд [20]:

$$y(Z) = \sum_{i=0}^{n-1} Z^{-(n-1)} [b_i U(Z) - d_i y(Z)]; \quad b_i = 0$$

якщо $i > m$

Помноження на $Z-1$ в області Z зображень відповідає затримці на період T в області оригіналів.

Схема в змінних станах для цифрових СФД буде відрізнятися від аналогових СФД тим, що замість інтегратора схема цифрового СФД має елементи затримки. Тому для побудови схем у змінних станах цифрових СФД необхідно в відповідних схемах для безперервних СФД інтегратори замінювати на елементи затримки. Рівняння стану цифрових СФД складаються з схем в змінних станах якщо в якості змінних станів вибрати виходи елементів затримки.

Таким чином, рівняння стану цифрового СФД будуть мати вигляд [19,20]:

$$\begin{aligned} \vec{X}(kT) &= \vec{A}\vec{X}(\bar{k}-1T) + \vec{B}\vec{U}(\bar{k}-1T); \\ \vec{Y}(kT) &= \vec{C}\vec{A}\vec{X}(\bar{k}-1T) + \vec{C}\vec{B}\vec{U}(\bar{k}-1T) + \vec{D}\vec{U}(\bar{k}T) \end{aligned} \quad (3)$$

Вираз (3) дозволяє побудувати ітераційний алгоритм обрахування вектора виходу $\vec{Y}(kT)$. На k -тій ітерації значення вектора $\vec{Y}(kT)$ в момент часу $t = kT$ визначається значенням вектора

стану $\vec{X}(\bar{k}-1T)$ і значенням вектора входу $\vec{U}(t)$ при $t=(k-1)T$ і $t=kT$. Вектор $x(\bar{k}-1T)$ вираховується $(k-1)$ -ї ітерації.

Аналіз виразу (3) показує, що його реалізація на ЕОМ не потребує проведення операцій інтегрування і приближеного обрахування матриці переходу [21]. Це підвищує можливості схеми побудов такого СФД до зменшення сталих похибок роботи як при аналізі на ЕОМ так і при безпосередній реалізації по обраній схемі його побудови

Висновки

В роботі розглянуті питання обґрунтування обрису перспективної моделі ланки розімкнутого зв'язку системи фазової синхронізації сучасної телекомунікації.

На прикладі обраної схеми побудови цифрового синхроннофазового демодулятора проведено синтез розімкнутого компенсаційного зв'язку в його структурі побудови за умови сталого режиму роботи.

Отримані та подані в роботі функціональні залежності передавальної функції синхроннофазового демодулятора з розімкнутим зв'язком дозволяють забезпечити порядок астатизму системи, що дорівнює 2.

Аналіз отриманої передавальної функції показав, що вона може бути реалізована на мікропроцесорах та має можливість переходу до її попереднього аналізу на ЕОМ без проведення операцій інтегрування і приближеного обрахування матриць.

Подальші дослідження

Подальшим напрямком досліджень є синтез розімкнутого зв'язку в синхронно-фазових демодуляторах з більш високим порядком астатизму на фоні адитивного гаусівського шуму при врахуванні фазової нестабільності генераторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lyons R. G. Understanding Digital Signal Processing. Boston: Prentice Hall, 2010. 992 p.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. Москва: Вильямс, 2003. 1104 с.
3. Шахтарин Б. И. Анализ систем синхронизации при наличии помех. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Горячая линия — Телеком, 2016. 360 с.
4. Банкет В. Л., Дорофеев В. М. Цифровые методы в спутниковой связи. Москва: Радио и связь, 1988. 240 с.
5. Бойко Ю. М. Оцінювання якісних показників пристроїв синхронізації сигналів засобів телекому-

нікацій. Вісник Хмельницького національного університету. 2015. № 1. С. 204–213.

6. Глухов А. В. Оптимизация параметров цифровых фильтров высокоскоростного модулятора для PLC-модем. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. Том 19, № 4. С. 751–756.

7. Туровський О. Л. Мінімізація дисперсії фазової помилки в системах фазової синхронізації замкнутого типу в режимі стеження за несучою частотою. Вісник інженерної академії. 2019. №4. С. 22–27

8. 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.

9. Golestan S., A. Vidal, A. G. Yepes, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez and J. Doval-Gandoy, "A True Open-Loop Synchronization Technique," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 12, no. 3, pp. 1093–1103, June 2016.

Doi: 10.1109/TII.2016.2550017.

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

11. Xiao, Y.-C & Wei, P. & Xiao, X.-C & Tai, H.-M. (2004). Fast and accurate single frequency estimator. *Electronics Letters*. 40. 910–911. 10.1049/el:20040558.

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

13. Коханов А. Б. Технология синхронного детектирования сигналов. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2007. Т. 50, № 11. С. 14–25.

14. Печенин В. В., Щербина К. А., Вонсович М. А., Мсаллам Е. П. Структурный синтез комбинированной системы частотно-фазовой автоподстройки частоты, совмещенной с фильтрующей схемой спектра входного сигнала. *Системы навигации, управления та зв'язку*. 2015. Випуск 4(36). С. 38–43.

15. Зайцев Г. Ф., Булгач В. Л., Гніденко О. М., Бурсова Т. В. Комбінована система частотного автотістроювання з астатизмом першого порядку. Функціональна схема, математична модель системи. *Вісник ДУІКТ*. 2012. Т.10, №3. С. 25–28.

16. Зайцев Г. Ф., Кривуца В. Г., Булгач В. Л., Радзивілов Г. Д. Мінімізація середньквдратических помилок и квадратических интегральных оценок следящих систем с помощью разомкнутых и дифференциальных связей. К. : ДУІКТ, 2006. 86 с.

17. Zaitsev, Grigoriy & Bulgach, Victor & Radzivilov, Grigoriy. (2005). Modeling of Combined Tracking Systems under Random Setting Action.

Journal of Automation and Information Sciences – J AUTOMAT INF SCI. 37. 2225.

18. **Buschman. R. G.** Integral Transformations, Operational Calculus, and Generalized Functions. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1996. 240 p.

19. **Эйдерман В. Я.** Основы теории функций комплексного переменного и операционного исчисления: учеб. пособие для вузов. М.: Физматлит, 2002. 256 с.

20. **Lars Hörmander** The Analysis of Linear Partial Differential Operators. Springer Science & Business Media, 2004, Berlin. 362 p.

<https://doi.org/10.1007/978-3-642-61497-2>.

21. **Зайцев Г. Ф.** Теория автоматического управления. Киев: Вища шк., 1988. 431 с.

Козловський В. В., Туровський О. Л., Кулінський В. Д.

ОБРИС ПЕРСПЕКТИВНОЇ МОДЕЛІ ЛАНКИ РОЗІМКНУТОГО ЗВ'ЯЗКУ СИСТЕМИ ФАЗОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ СУЧАСНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

В роботі розглянуті питання обґрунтування обрисів перспективної моделі ланки розімкнутого зв'язку системи фазової синхронізації сучасної телекомунікації. Обґрунтування обрисів та розробка необхідної математичної моделі ланки розімкнутого зв'язку в роботі здійснено при умовах: підтримання високої швидкодії системи; забезпечення астатизму вищого порядку системи; можливості щодо мінімізації дисперсії фазової помилки системи фазової синхронізації; можливості до реалізації розробленої математичної моделі ланки розімкнутого зв'язку на існуючій елементній базі.

В якості вихідної схеми для подальшого моделювання ланки розімкнутого зв'язку з необхідними властивостями в роботі обрано схему синхронно-фазового демодулятора.

Отримані та подані в роботі математичні залежності передавальної функції синхронно-фазового демодулятора з розімкнутим зв'язком дозволяють підтримати порядок астатизму системи рівний двом та забезпечити необхідну динаміку системи фазової синхронізації в сталих режимах оцінки несучої частоти. Математична модель запропонованої передавальної функції може бути реалізована на мікропроцесорах та має можливість до її попереднього аналізу на електронно-обчислювальних машинах без проведення попередньої операції інтегрування і наближеного обрахування матриць переходу. Подальшим напрямком досліджень, розпочатих в даній роботі, є синтез розімкнутого зв'язку в синхронно-фазових демодуляторах з більш високим порядком астатизму в перехідних режимах роботи системи фазової синхронізації.

Ключові слова. цифровий синхронно-фазовий демодулятор; синхронізація несучої частоти; синтез розімкнутого зв'язку; порядок астатизму.

Kozlovsky V., Turovsky O., Kulinsky V.

OUTLINE OF A PERSPECTIVE MODEL OF THE LINK OF THE OPEN COMMUNICATION OF THE SYSTEM OF PHASE SYNCHRONIZATION OF MODERN TELECOMMUNICATIONS

The paper considers the issues of substantiation of the outline of a promising model of the open link of the phase synchronization system of modern telecommunications. Substantiation of the outline and development of the necessary mathematical model of the link of open communication in the work is carried out under the following conditions: maintaining high system speed; ensuring higher-order astatism of the system; possibilities for minimizing the phase error variance of the phase synchronization system; opportunities to implement the developed mathematical model of the open link on the existing element base.

The synchronous-phase demodulator scheme was chosen as the initial scheme for further modeling of the open communication link with the necessary properties in the work.

The obtained and presented mathematical dependences of the transfer function of the synchronous-phase demodulator with open connection allow to maintain the order of astatism of the system equal to two and provide the necessary dynamics of the phase synchronization system in constant modes of carrier frequency estimation. The mathematical model of the proposed transfer function can be implemented on microprocessors and has the ability to its preliminary analysis on computers without prior integration operations and approximate calculation of transition matrices. A further direction of research initiated in this work is the synthesis of open communication in synchronous-phase demodulators with a higher order of astatism in the transient modes of operation of the phase synchronization system.

Keywords: digital synchronous-phase demodulator; carrier frequency synchronization; open link synthesis; order of astatism.

Козловский В. В., Туровский А. Л., Кулинский В. Д.
АБРИС ПЕРСПЕКТИВНОЙ МОДЕЛИ ЗВЕНА РАЗОМКНУТОЙ СВЯЗИ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

В работе рассмотрены вопросы обоснования очертания перспективной модели звена разомкнутой связи системы фазовой синхронизации современной связи. Обоснование очертания и разработка необходимой математической модели звена разомкнутой связи в работе осуществлено при условиях: поддержание высокого быстродействия системы; обеспечение астатизма высшего порядка системы; возможности минимизации дисперсии фазовой ошибки системы фазовой синхронизации; возможности для реализации разработанной математической модели звена разомкнутой связи на существующей элементной базе.

В качестве исходной схемы для дальнейшего моделирования звена разомкнутой связи с необходимыми свойствами в работе избран схему синхронно-фазового демодулятора.

Полученные и представленные в работе математические зависимости передаточной функции синхронно-фазового демодулятора с разомкнутым связью позволяют поддержать порядок астатизма системы равен двум и обеспечить необходимую динамику системы фазовой синхронизации в установившихся режимах оценки несущей частоты. Математическая модель предложенной передаточной функции может быть реализована на микропроцессорах и имеет возможность к ее предварительному анализу на электронно-вычислительных машинах без проведения предварительной операций интегрирования и приближенного расчета матриц перехода. Дальнейшим направлением исследований, начатых в данной работе, является синтез разомкнутой связи в синхронно-фазовых демодулятор с более высоким порядком астатизма в переходных режимах работы системы фазовой синхронизации.

Ключевые слова: цифровой синхронно-фазовый демодулятор; синхронизация несущей частоты; синтез разомкнутой связи; порядок астатизма.

Стаття надійшла до редакції 01.11.2020 р.

Прийнято до друку 10.12.2020 р.