

УДК 621.396

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.035054

О. Л. ТУРОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доцент;
Державний університет телекомунікацій, Київ

ОЦІНЮВАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ СИНТЕЗУ РОЗІМКНЕНОГО ЗВ'ЯЗКУ В ПРОЦЕСІ СТВОРЕННЯ КОМБІНОВАНОГО ЦИФРОВОГО СИНХРОННО-ФАЗОВОГО ДЕМОДУЛЯТОРА СУЧАСНОЇ СИСТЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Розглянуто питання синтезу розімкненого зв'язку в підсистемах фазової синхронізації цифрових комбінованих синхронно-фазових демодуляторів сучасних систем телекомунікації. На прикладі вибраної схеми побудови цифрового синхронно-фазового демодулятора проведено синтез розімкненого компенсаційного зв'язку в його структурі побудови за умови сталого режиму роботи. Отримані та подані в роботі функціональні залежності передатної функції синхронно-фазового демодулятора з розімкненим зв'язком дають змогу забезпечити другий порядок астатизму системи. Аналіз здобутої передатної функції показав, що вона може бути реалізована на мікропроцесорах та має можливість до її попереднього аналізу на ЕОМ без проведення операцій інтегрування і наближеного обчислення матриць переходу. Подальшим напрямком досліджень, розпочатих у даній статті, є синтез розімкненого зв'язку в синхронно-фазових демодуляторах із більш високим порядком астатизму на фоні адитивного гауссівського шуму з урахуванням фазової нестабільності генераторів.

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

Вступ

Ефективність застосування засобів сучасного радіозв'язку безпосередньо залежить від показників якості використання окремих пристроїв та підсистем з їх складу. До таких пристроїв зокрема належать стежні демодулятори частотно-модульованих та фазомодульованих 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 максимуму апостеріорної густини розподілу ймовірності і найбільш повно реалізується апріорна інформація про передане повідомлення [1]. Від показників якості синхронно-фазових демодуляторів залежить вірогідність переданої інформації від її джерела до її отримувача.

Необхідно зазначити, що одними з основних підсистем розглядуваних демодуляторів є системи фазової синхронізації, які в фазокогерентних системах телекомунікації і керування застосовуються для відновлення несучої і тактової частот сигналу, що приймається, та для когерентної демодуляції прийнятих системою аналогових і цифрових сигналів із кутовою модуляцією [1; 2].

Функціонування синхронно-фазових демодуляторів (СФД) характеризується впливом низки збурень та шумів на їх роботу під час приймання сигналу, а саме: адитивного флуктуаційного шуму, збурення корисної кутової модуляції (у разі фільтрації несучої частоти), стрибків фази і частоти тощо.

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 за умов впливу різних шумів та збурень, мають характеризуватися малою дисперсією фазової помилки і високою швидкодією [3].

Синхронно-фазові демодулятори будують за двома схемами. Це неперервні (аналогові) СФД та цифрові (дискретні) СФД [1; 2].

Як і в неперервних СФД, показник якості цифрових фазових автопідстроювачів частоти (ФАПЧ) впливає на основні характеристики цифрових демодуляторів. Зазвичай цифрові СФД будують у такий спосіб, що частину вузлів виконано на елементах цифрової техніки: цифрових фазових дискримінаторах, реверсних лічильниках, генераторах. Іноді СФД повністю створюють на основі цифрових обчислювальних пристроїв (ЦОП). Застосування ЦОП під час побудови СФД дає змогу спростити їх налаштування, підвищити надійність і технологічність конструкції, реалізувати складні алгоритми оброблення сигналу [4].

Можливості застосування цифрових СФД залежать від розвитку цифрової обчислювальної техніки та мікропроцесорів. Швидкий прогрес цих напрямків зумовлює успішне кункурування цифрових СФД з аналоговими.

Якщо СФД виконано із застосуванням цифрових та аналогових елементів, то такий СФД називають аналого-цифровим СФД.

© О. Л. Туровський, 2020

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

Розв'язання цієї задачі безпосередньо пов'язано як із синтезом розірваного зв'язку в цифровому СФД, так і з оцінюванням можливостей такого СФД щодо реалізації отриманих у процесі синтезу розімкненого зв'язку передатних функцій у схемах побудови його системи синхронізації та можливостей стосовно попереднього аналізу зазначених передатних функцій на ЕОМ.

Необхідно зауважити, що робота СФД будь-якого типу характеризується двома режимами: роботою в сталому режимі та роботою в перехідному режимі.

Очевидно оцінювання можливостей синтезування розімкненого зв'язку в підсистемі синхронізації СФД доцільно провести на основі аналізу передатних функцій, здобутих для більш простого, сталого режиму роботи СФД.

Аналіз останніх публікацій та постановка проблеми. У наукових працях, присвячених підвищенню ефективності роботи СФД, достатньо широко висвітлено питання оптимізації схеми підсистем фазової синхронізації з їх складу.

У роботах [1; 5; 6] описано дослідження та методи, спрямовані в основному на оптимізацію параметрів фільтра і системи синхронізації в цілому для класу замкнених систем синхронізації (ЗСС). Однак у цих роботах відсутнє оцінювання щодо можливостей аналізу запропонованих методів і їх практичних реалізацій.

У роботах [7; 8] визначено, що ЗСС через властиві їм протиріччя не дають змогу в низці випадків забезпечити необхідну якість роботи. Це особливо відчутно, коли потрібно підвищити якість системи за двома і більше суперечливими показниками. Наприклад, прагнення збільшити здатність щодо фільтрації системи синхронізації в класі ЗСС призводить до неминучого стиснення смуги утримання, а прагнення підвищити порядок астатизму погіршує динаміку системи.

Великі перспективи щодо підвищення якості систем синхронізації є в класі комбінованих підсистем синхронізації зі складу СФД, які можуть поєднувати принципи регулювання за відхиленням і збуренням, що визначалось як перспективні методи в [2; 3; 9].

Однак можливості комбінованих системи синхронізації (КСС) різного типу сьогодні мало досліджено.

Так, у більшості праць щодо КСС, наприклад [10; 11], в основному здійснюється 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 КСС, перспективна комбінована підсистема 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 [12].

Таким чином, розв'язання наукового завдання стосовно попереднього синтезу розірваного зв'язку в комбінованій підсистемі фазової синхронізації зі складу цифрового СФД, оцінювання можливостей такого СФД щодо реалізації здобутих у процесі синтезу передатних функцій у схемах побудови його підсистемі синхронізації та оцінювання можливостей до попереднього аналізу вказаних передатних функцій на ЕОМ є актуальною науковою задачею.

Основна частина

Відомо два методи побудови структурної схеми цифрового СФД. Структурна схема СФД, що містить цифровий керований генератор (ЦКГ), включає в себе вхідний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), цифровий фазовий демодулятор, цифровий фільтр (ЦФ), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), фільтр низької частоти. Вихідні сигнали функціонально необхідних елементів є кодами, а сам цифровий СФД реалізується у вигляді спеціалізованого обчислювача чи програмним способом на керуючій ЕОМ (КЕОМ). Основною перевагою такої схеми є висока стабільність характеристик цифрового обчислювального пристрою (ЦОП) порівняно з аналоговим керованим генератором [1; 4].

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

Такі характеристики СФД, як смуга захвату й утримання та стійкість, можуть значно погіршуватися через похибки цифрового оброблення порівняно з аналогічними характеристиками аналогового СФД. Якщо підібрати при мінімальній кількості рівнів квантування частоту дискретизації, то можна

побудувати цифровий СФД, порогові явища в якому проявляються майже за таких значень сигнал/шум на вході, що і для аналогового СФД [4; 13].

Комбінований спосіб побудови СФД дає можливість забезпечити високу точність роботи в сталих режимах. Цифрові стежні демодулятори з комбінованим керуванням можна побудувати за одним із трьох варіантів: цифровий обчислювальний пристрій використовується як в замкненому, так і в розімкненому каналах керування; ЦОП застосовується в замкненому контурі, а розімкнений канал неперервний; ЦОП застосовується в розімкненому каналі керування [14–16].

Структурну схему цифрового СФД із комбінованим керуванням зображено на рисунку [17].

Точність роботи цифрового СФД, як будь-якої системи автоматичного керування залежить від виду оператора неперервної частини СФД [16; 17].

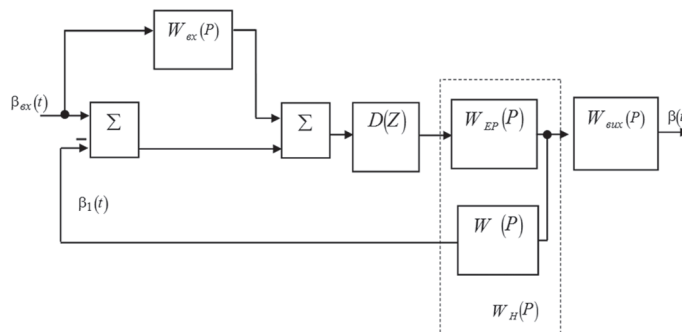
Візьмемо як такий оператор наступний [18; 19]:

$$W_H = \frac{K}{(T_{p+1})^p}. \quad (1)$$

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

$$W_H(j\lambda) = \frac{K}{(T; \lambda + 1)j\lambda},$$

де $\lambda = \frac{2}{T_b} \operatorname{tg} \frac{\omega T_b}{2}$; ω — частота вхідного сигналу; T_b — крок видачі сигналу ЦОП.



Структурна схема лінійної моделі комбінованого синхронно-фазового демодулятора

Абсолютну псевдочастоту можна подати виразом $\lambda = \frac{2}{T_b} \frac{W}{j}$, де $W = \frac{Z-1}{z+1}$ — оператор Z -перетворення [20].

Еквівалентну передатну функцію цифрового комбінованого СФД у розімкненому стані подамо у 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 $W_{\text{вх}}(j\lambda) = a_j \lambda$, дістанемо

$$W_{EP}(j\lambda) = [K(1 + a_j \lambda)] / [T(j\lambda)^2 + j\lambda - Ka_j \lambda].$$

У разі $a = \frac{1}{K}$ маємо $W_{EP}(j\lambda) = \frac{K(1 + a_j \lambda)}{T(j\lambda)^2}$.

Така передатна функція відповідає СФД з другим порядком астатизму [17; 20].

Для визначення $W_{\text{вх}}(Z)$ перейдемо від $a_j \lambda$ до Z -відбиття.

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

де $q_0 = q_1 = \frac{2a}{T_0}$; $a_0 = a_1 = 1$.

Реалізація передатної функції виду (2) достатньо добре здійснюється на мікропроцесорах ЕОМ [21].

Таким чином, цифровий комбінований СФД можна синтезувати за умови підвищення точності в сталих режимах як неперервну комбіновану систему згідно з вибраними 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 неперервно в часі, а тільки в дискретні моменти часу.

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

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

Множення на $Z-1$ у ділянці Z -відбиття відповідає затримці на період T у ділянці 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 у відповідних схемах для неперервних СФД інтегратори замінювати на елементи затримки. Рівняння стану цифрових СФД складаються зі схем у змінних станах, якщо як змінні стани вибрати виходи елементів затримки.

Таким чином, рівняння стану цифрового СФД наберуть такого вигляду [19; 20]:

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

Вираз (3) дає змогу побудувати ітераційний алгоритм обчислення вектора виходу $\bar{Y}(kT)$. На k -й ітерації значення вектора $\bar{Y}(kT)$ у момент часу $t = kT$ визначається значенням вектора стану $\bar{X}(\bar{k}-1T)$ і значенням вектора входу $\bar{U}(t)$ при $t = (k-1)T$ і $t = kT$. Вектор $x(\bar{k}-1T)$ відшукується $(k-1)$ -й ітерації.

Аналіз виразу (3) показує, що його реалізація на ЕОМ не потребує проведення операцій інтегрування і наближеного обрахування матриці переходу [21]. Це підвищує можливості схеми побудов такого СФД до зменшення сталих похибок роботи як у процесі аналізу на ЕОМ, так і під час безпосередньої реалізації за вибраною схемою його побудови.

Висновки

У статті розглянуто можливості щодо синтезу розімкненого зв'язку в підсистемах фазової синхронізації комбінованих цифрових синхронно-фазових демодуляторів.

На прикладі вибраної схеми побудови цифрового синхронно-фазового демодулятора проведено синтез розімкненого компенсаційного зв'язку в його структурі побудови за умови сталого режиму роботи.

Здобуті та подані в роботі функціональні залежності передатної функції синхронно-фазового демодулятора з розімкненим зв'язком дають можливість забезпечити другий порядок астатизму системи.

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

Подальшим напрямком досліджень є синтез розімкненого зв'язку в синхронно-фазових демодуляторах із більш високим порядком астатизму на фоні адитивного гауссівського шуму з урахуванням фазової нестабільності генераторів.

Список використаної літератури

1. Lyons R. G. *Understanding Digital Signal Processing*. Boston: Prentice Hall, 2010. 992 p.
2. Скляр В. *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 телекомунікацій. *Вісник Хмельниць. нац. ун-ту*. 2015. № 1. С. 204–213.
6. Глухов А. В. Оптимізація параметрів цифрових фільтрів високоскоростного модулятора для PLC-модемів // *Вестник Тамбов. гос. техн. ун-та*. 2013. Т. 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 інженер. 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) Wroclaw, 2010. P. 366–3673.
9. A True Open-Loop Synchronization Technique / S. Golestan, A. Vidal, A. G. Yepes [et all.] // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. June 2016. Vol. 12, no. 3. P. 1093–1103.
10. 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.

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., Єрмоєнко 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.) Одеса, 2015. С. 192–194.
13. Коханов А. Б. Технологія синхронного детектування сигналів // *Известия вузов. Радиоелектроника*. 2007. Т. 50. № 11. С. 14–25.
14. Структурний синтез комбінованої системи частотно-фазової автоподстроївки частоти, совмещенной с фильтрующей схемой спектра входного сигнала / В. В. Печенин, К. А. Щербина, М. А. Вонсович, Е. П. Мсаллам // *Системи навігації, керування та зв'язку*. 2015. Вип. 4(36). С. 38–43.
15. Комбінована система частотного автопідстроювання з астатизмом першого порядку. Функціональна схема, математична модель системи / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, О. М. Гніденко, Т. В. Бурсова // *Вісник ДУІКТ*. 2012. Т. 10. №3. С. 25–28.
16. Минимизация среднеквадратических ошибок и квадратических интегральных оценок следящих систем с помощью разомкнутых и дифференциальных связей / Г. Ф. Зайцев, В. Г. Кривуца, В. Л. Булгач, Г. Д. Радзивилов // *Киев: ДУІКТ*, 2006. 186 с.
17. Zaitsev G., Bulgach V., Radzivilov G. (2005). Modeling of Combined Tracking Systems under Random Setting Action // *Journ. of Automation and Information Sciences*. 2005. J AUTOMAT INF SCI. 37. P. 22–25.
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. Москва: Физматлит, 2002. 256 с.
20. Hörmander L. *The Analysis of Linear Partial Differential Operators* // Springer Science & Business Media, 2004, Berlin. 362 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61497-2>.
21. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления. Киев: Вища школа, 1988. 431 с.

А. Л. Туровский

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИНТЕЗА РАЗОМКНУТОЙ СВЯЗИ В ПРОЦЕССЕ СОЗДАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ЦИФРОВОГО СИНХРОННО-ФАЗОВОГО ДЕМОДУЛЯТОРА СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Рассмотрены вопросы синтеза разомкнутой связи в подсистемах фазовой синхронизации цифровых комбинированных синхронно-фазовых демодуляторов современных систем связи. На примере выбранной схемы построения цифрового синхронно-фазового демодулятора проведен синтез разомкнутой компенсационной связи в его структуре построения при установившемся режиме работы. Полученные и представленные в работе функциональные зависимости передаточной функции синхронно-фазового демодулятора с разомкнутой связью позволяют обеспечить второй порядок астатизма системы. Анализ полученной передаточной функции показал, что она может быть реализована на микропроцессорах и имеет возможность к предварительному ее анализу на ЭВМ без проведения операций интегрирования и приближенного вычисления матриц перехода. Дальнейшим направлением исследований, начатых в данной статье, является синтез разомкнутой связи в синхронно-фазовом демодуляторе с более высоким порядком астатизма на фоне аддитивного гауссовского шума с учетом фазовой нестабильности генераторов.

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

O. Turovskyi

EVALUATION OF OPPORTUNITIES OF SYNTHESIS OF THE BROKEN COMMUNICATION AT CREATION OF COMBINED DIGITAL SYNCHRONOUS-PHASE DEMODULATOR OF MODERN SYSTEM TELECOMMUNICATIONS

The effectiveness of modern radio communications directly depends on the quality of use of individual devices and subsystems of their composition. Such spaces include, in particular, tracking demodulators of frequency-modulated and phase-modulated signals. The task of improving the accuracy and speed of analog-digital SFDs is urgent. One of the directions of which can be the synthesis of digital open compensation communication directly in their synchronization subsystem, namely the construction of iterative analog-digital SFDs, provided that the main and auxiliary circuits of their synchronization systems can be both digital and analog. The issues of synthesis of open communication in subsystems of phase synchronization of digital synchronous phase demodulators of modern telecommunication systems are considered in the work. On the example of the selected scheme of construction of a digital synchronous phase demodulator, the synthesis of an open compensation connection in its construction structure for a steady state operation is performed. The obtained and presented functional dependences of the transfer function of the synchronous-phase demodulator with open communication allow to ensure the order of astatism of the system is 2. Analysis of the obtained transfer function showed that it can be implemented on microprocessors and has the ability to pre-analyze it on a computer without operations of integration and approximate calculation of transition matrices. A further direction of research initiated in this work is the synthesis of open coupling in synchronous-phase demodulators with a higher order of astatism against the background of additive Gaussian noise, taking into account the phase instability of the generators.

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