

*К. Л. ГОРЯЩЕНКО*, канд. техн. наук, доц., Хмельницький національний університет, Хмельницький

## **МОДЕЛЮВАННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ СПЕКТРУ СИГНАЛУ ОПОРНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ЗАДАЧ ФАЗОВІЙ ДАЛЬНОМЕТРІЇ У СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ**

В статті представлені результати дослідження спектрального аналізу сигналів, що складаються з гармонійних сигналів із нецілими періодами. Створено модель генератора опорного сигналу із заданою шириною спектра. Для аналізу застосовано дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). Досліджено зміну спектральних складових при зміні ширини вікна аналізу за рахунок відкидання відліків. Встановлено можливість більш точного визначення спектральних складових сигналу за рахунок накопичення результатів ДПФ. Іл.: 5. Табл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

**Ключові слова:** спектр; модель генератора; генератор опорного сигналу; дискретне перетворення Фур'є.

**Постановка проблеми та аналіз літератури** Для аналізу стану провідникової лінії застосовуються різні методи. Найбільш відомі це методи рефлектометрії. Класична та проста в реалізації це імпульсна рефлектометрія або рефлектометрія в часовій області (time dimension reflectometry, TDR). Розвиток цифрової техніки дозволив впроваджувати інший вид рефлектометрії – фазова рефлектометрія або рефлектометрія в частотній області (frequency dimension reflectometry, FDR).

Багаточастотний фазовий метод визначення, що базується на відбиттях від пошкоджень є зручним інструментом для аналізу стану такої лінії. В сучасних дослідженнях неодноразово вказувалось на можливість однозначності в трактуванні отриманої інформації таким методом [1, 2].

В роботах [1, 2] було показано, що незважаючи на те, що сигнали відбиття у фазовому методі на кожній частоті є векторною сумою гармонійних сигналів на частоті зондування, але вектор суми цих сигналів буде змінюватись в залежності від частоти сигналу. Причина полягає у зміні сумарного кута зсуву фази в кожному випадку, для якого він визначається приростом кута зсуву фази для кожного відбиття від частоти. А отже, як це було показано в [2 – 4], має місце так зване обертання вектору відбиття (або еквівалентна йому за сенсом швидкість зміни кута зсуву фази відбиття) від частоти з певною кутовою швидкістю, яка визначається згідно виразу [4]:

$$\Omega = \frac{d\varphi}{d\omega}, \quad (1)$$

де  $d\varphi$  – приріст кута зсуву фази, що виникає при зміні частоти зонduючого сигналу на величину  $d\omega$ .

Отже, в основі виразу (1) знаходиться частота  $\omega$  опорного генератора. Зазвичай до генератора виставляється вимога забезпечення високої стабільності сигналу в часі, а також мінімальна нерівномірність спектру сигналу на виході такого опорного генератора. Питанням побудови високостабільних опорних генераторів займалися багато авторів та наукових колективів [5]. Такі генератори сильно відрізняються за середньою частотою, рівневі сигналів і відносній нестабільності частоти, яка може змінюватись від  $10^{-3}$  до  $10^{-15}$ . Періодичні коливання автономних генераторів  $u(t)$  характеризуються середньою частотою, формою коливання на протязі його періоду і флуктуаціями поточної фази. Стабільність частот таких генераторів оцінюється порівнянням їх сигналів з коливаннями вторинних стандартів частоти. Майже гармонічне коливання опорного автогенератора можна записати у вигляді:

$$u(t) = u_0[1 + \mu(t)]\sin[2\pi f_0 t + \varepsilon(t) + \varphi_0], \quad (2)$$

де  $u_0$  і  $f_0$  – амплітуда і носійна частота опорного сигналу,  $\mu(t)$  і  $\varepsilon(t)$  – амплітудна та фазові нестабільності опорного сигналу,  $\varphi_0$  – початкова фаза коливання.

Безпосередньо після увімкнення напруг автогенераторів у змінні  $\mu(t)$  і  $\varepsilon(t)$  входять регулярні складові, що визначають тривалість встановлення амплітуди та вибіг частоти під час прогріву.

У фіксованому температурному режимі процеси, що викликають амплітудну та фазові нестабільності є випадковими. При довготривалій роботі можливий дрейф середньої частоти, що пов'язаний із старінням стабілізуючого резонатора або деградацією вакууму у колбах атомних стандартів частоти [6]. Форма коливань автогенераторів, будь якої конструкції не є абсолютно гармонічною. Характеристика спотворення форми гармонічного коливання являє собою рівень потужності вищих гармонік в  $S_m(f)$  на частотах  $2f_0$  і  $3f_0$  або потужність усіх паразитних спектральних компонент у широкій смузі частот по відношенню до потужності на носійній частоті. Порівняння параметрів опорних генераторів наведено у таблиці.

**Мета статті.** Застосування високостабільних за частотою та у часі опорних генераторів дозволяє реалізувати апаратно пристрій для аналізу стану та визначення параметрів пошкоджень в лініях зв'язку на основі виразу (1). Проте в літературі не міститься докладних досліджень щодо

впливу нерівномірності спектру сигналу опорного генератора на результат вимірювання в фазових методах. Тому метою статті є моделювання в середовищі Matlab генератора сигналу, форма сигналу якого наближено до реального, та оцінювання впливу його на вимірювальний сигнал фазової рефлектометрії.

Таблиця

Порівняльні характеристики  
високоточних опорних генераторів

	ТКГ	ТСТ	Атомний стандарт	Атомний стандарт CSAC
Фізичний об'єм, см <sup>3</sup>	0,07	52	122	16
Потужність при 25 °С, Вт	0,020	3,0	10,0	0,120
Початкова точність	$<1 \times 10^{-6}$	$<1 \times 10^{-7}$	$<5 \times 10^{-11}$	$<5 \times 10^{-11}$
Температурний коефіцієнт	$\pm 3 \times 10^{-7}$	$\pm 3 \times 10^{-8}$	$\pm 3 \times 10^{-10}$	$\pm 1 \times 10^{-9}$
Вартість	низька	висока	висока	висока

ТКГ – термокомпенсовані генератори

ТСТ – термостабілізовані генератори

**Основна частина.** Для визначення пошкоджень в провідниковій лінії та визначення характеристик цих пошкоджень, в роботі [7] запропоновано застосовувати алгоритм на основі зміни ширини вікна для дискретного перетворення Фур'є.

Проведені моделювання були виконані для ідеального сигналу виду  $U_0 \cos(2\pi f_0 t)$ , для якого цілком зрозуміло, що спектр такого сигналу містить тільки центральну частоту  $f_0$ . Для моделювання використано середовище MatLab. Для формування спектру сигналу було використано окрему процедуру, лістинг якої показано на рис. 1. SigKoeff – масив коефіцієнтів, що відображують нерівномірність спектру, від 0 до +1. Встановлення відповідних значень дозволяє описати довільну нерівномірність спектру генератора. SigKoeffSt визначає вид характеристики.

Результатом створеного масиву є характеристика, яка за своєю формою відповідає до спектральної характеристики довільного генератора, для якого характерно наявність центральної частоти та бічні частоти. Індекс елемента SigKoeff відповідає певній частоті генератора згідно виразу  $f = f_0 \cdot \text{SigKoeff}$ . Характеристика спектру генератора показана на рис. 2.

```

FrMax = 20;
SigKoeffSt = 10;
SigKoeff = zeros(FrMax*2+1);
for Fr = -FrMax:+1:+FrMax
    SigKoeff(Fr+FrMax+1) = (1-abs(Fr)/FrMax)^SigKoeffSt;
end;

```

Рис. 1. Процедура формування масиву значень нерівномірності спектру сигналу

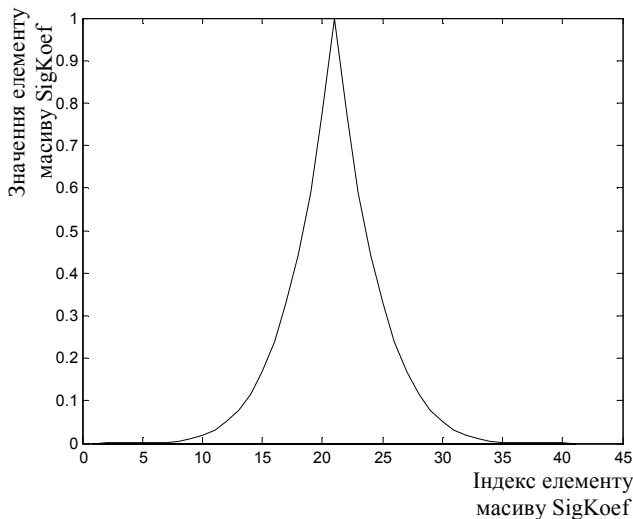


Рис. 2. Характеристика довільного генератора, що описується масивом SigKoeff при SigKoeffSt = 10

Вихідний тестовий сигнал формується згідно до лістингу рис. 3. В даному моделюванні розглядається задача визначення складових сигналу, що мають довільні, нецілі частоти.

Для оцінювання відношення потужності корисного вузькосмугового сигналу (носійної) до потужності найбільш потужної паразитної частотної складової (гармоніки) використовується безрозмірна величина, відома як *SFDR* (Spurious-Free Dynamic Range, динамічний діапазон вільний від паразитних складових) [8]:

$$SFDR = 10 \log(P_{\max}/P_{\text{average}}),$$

де  $P_{\max}$  – потужність максимальна;  $P_{\text{average}}$  – середня потужність по ширині спектру сигналу.

Так, для сигналу генератора з 40 відліків ( $FrMax = 20$ ) та при  $SigKoeffSt = 35$ , отримаємо *SFDR* в 14,8 дБ. Для сигналу з 100 відліків та  $SigKoeffSt = 55$  відповідне значення *SFDR* складе 17,4 дБ. Для прикладу,

дешевий DDS генератор (до 120 МГц) AD9850 забезпечує SFDR на рівні не нижче 50 дБ [9].

Розглянемо сигнал відбиття, що формується для декількох пошкоджень абонентської лінії. Приклад коду наведено на рис. 3.

```

% амплітуда
am1 = +1.2e-1;
am2 = +2.4e+1;
am3 = -4.2e+1;
am4 = +2.9e+1;

% частота
s1 = 10.4;
s2 = 64.1;
s3 = 87.3;
s4 = 106.2;

% початковий зсув фази
p1 = 0.5*pi;
p2 = 0.7*pi;
p3 = 1.2*pi;
p4 = 0.2*pi;

for Fr = -FrMax+1:+FrMax
    y = y + SigKcoef (Fr+FrMax+1)*am1*sin(2*pi*(s1+Fr)*t + p1);
    y = y + SigKcoef (Fr+FrMax+1)*am2*sin(2*pi*(s2+Fr)*t + p2);
    y = y + SigKcoef (Fr+FrMax+1)*am3*sin(2*pi*(s3+Fr)*t + p3);
    y = y + SigKcoef (Fr+FrMax+1)*am4*sin(2*pi*(s4+Fr)*t + p4);
end;

```

Рис. 3. Формування тестового сигналу

Результатом моделювання є відповідний сигнал [4], що представляє собою сукупність миттєвих значень амплітуд сигналів з різними частотами згідно до параметрів амплітуди, частоти та фази.

На рис. 4 показано результат роботи алгоритму, що розроблено у роботі [7] для виявлення складових сигналу з довільним значенням частот та фаз.

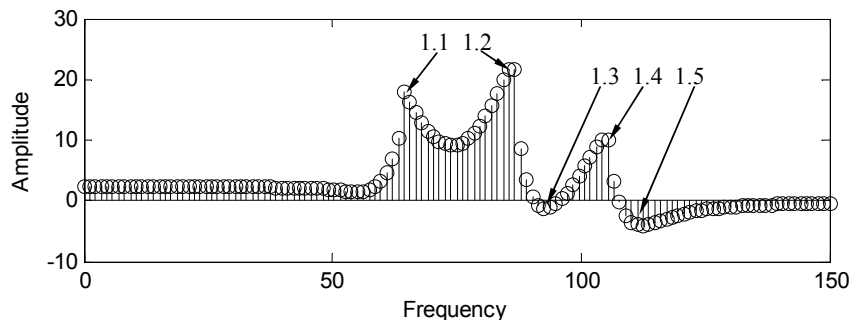


Рис. 4. Спектральний аналіз синтезованого сигналу із застосуванням ДПФ

Для порівняння показано результати ДПФ вхідного сигналу.

Цифрами "5" та "30" показано криві, що відображують спектральні складові при  $\text{SigKoeffSt} = 5$  та  $\text{SigKoeffSt} = 30$ , відповідно. Буквами "А" та "Б" показані найбільш характерні складові.

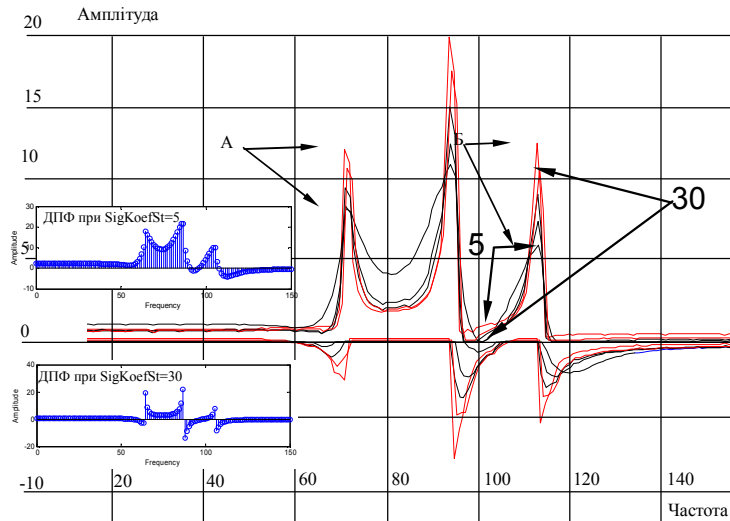


Рис. 5. Виявлення складових сигналу фазової рефлектометрії з довільним значенням частот та фаз при  $\text{SigKoeffSt} = 5$  та  $30$ .

Як видно з рисунку, зростання значення  $\text{SigKoeffSt}$ , а отже і рівня придушення бокових гармонік в спектрі, дозволяє більш вірно виявляти амплітуди сигналів. Для прикладу, сигнал "А" є значно вищим за амплітудою ніж сигнал "Б" (рис. 5) при рівні  $\text{SigKoeffSt} = 5$ , а вже за рівні  $\text{SigKoeffSt} = 30$  сигнал "Б" стає вищим за "А", що коректніше відображує рівні сигналів в початковому модельованому сигналі (рівні 24 та 29 умовних одиниць). Подальше зростання  $\text{SigKoeffSt}$  наближає значення амплітуд та їх співвідношення до початкового, що задано на початку. Крім того, зменшується розтікання сигналів та покращується їх форма, що дозволяє детектувати сигнали з меншими амплітудами.

**Висновки.** В результаті проведеного теоретичного дослідження впливу рівня динамічного діапазону вільного від паразитних складових (SFDR) сигналу опорного генератора на сумарний сигнал відбиття в фазовій дальнометрії обґрунтовано можливість застосування спектрального аналізу зі змінною шириною вікна. Отримана модель опорного генератора дозволяє задавати довільний рівень SFDR. В результаті порівняння SFDR моделі опорного генератора із SFDR існуючих генераторів встановлено, що генератори на базі DDS-синтезаторів володіють вищим рівнем SFDR, а отже можуть бути

використані для практичного застосування.

**Список літератури:**

1. Мазур І. Аналіз сумарного фазового сигналу відбиття на різних частотах методами спектрального аналізу / І. Мазур, К.Л. Горященко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – № 2. – С. 36-40.
2. Горященко К.Л. Імпульсно-фазові вимірювання для лінії із двома неоднорідностями / К.Л. Горященко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2003. – № 1. – С. 80-82.
3. Горященко К.Л. Аналіз спектральних складових сумарного сигналу для багатоскального фазового методу аналізу стану лінії зв'язку. Повідомлення 1 / К.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – Т. 1. – № 6. – С. 115-120.
4. Горященко К.Л. Обертання часових складових сумарного сигналу в фазовій дальнометрії / К.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 1. – С.144-147.
5. Полікарровських О.І. Система передавання цифрових даних / О.І. Полікарровських, І.В. Троцишин, І.В. Любчик // Збірник наукових праць. За результатами ІХ-НТК "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". – 2002. – Том.1. – С. 187–190.
6. Бондарев В.Н. Цифровая обработка сигналов: методы и средства.: Учебное пособие для вузов / В.Н. Бондарев, Г. Трестер, В.С. Чернега. – Х. : Конус, 2001. – С. 398.
7. Horiashchenko Kostyantyn. Spectral components definition of the signal with harmonic signal noninteger period components. Khmelnytsky national university, Khmelnytsky, Ukraine. 2014. Issue 1. – P. 195-198.
8. Walt Kester, MT-003: Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so You Don't Get Lost in the Noise Floor, Analog Devices, Retrieved 26 July 2011.
9. AD9850. CMOS, 125 MHz Complete DDS Synthesizer. Analog Device. // <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf>

**References:**

1. Mazur I., and Horiashchenko K.L. (2009), "Analysis of the total phase reflection signal at different frequencies of the methods of spectral analysis". *Khmelnytsky. Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, Issue 2, pp. 36-40.
2. Horiashchenko K.L. (2003), "Pulse-phase measurements for a line with two inhomogeneous". *Khmelnytsky. Measuring and Computing Devices in Technological Processes. Issue 1*, pp. 80-82.
3. Horiashchenko K.L. (2007), "Analysis of the spectral structures of the total signal for the multi-phase phase analysis of the state of the communication line. Message 1". *Khmelnytsky. Herald of the Khmelnytsky National University. Technical Sciences. Issue 6, Part 1*, pp. 115-120.
4. Horiashchenko K.L. (2007), "Rotation of time components of the total signal in the phase ranging". *Khmelnytsky. Herald of the Khmelnytsky National University. Technical Sciences. Issue 1*. pp.144-147.
5. Polikarovskiy O.I., Trotsishin I.V., and Lyubchik V.R. (2002), Digital data transmitting system. Collection of scientific works. "*Measuring and computing engineering in technological processes*". Issue 1, pp. 187-190.
6. Bondarev V.N., Trester G., and Chernega V.S. (2001), *Digital Signaling: Methods and Tools.: Textbook for High Schools*. Konus, Kharkov, pp. 398.

7. Horiashchenko Kostyantyn. (2014) "Spectral components definition of the signal with harmonic signal noninteger period components". *Journal of Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine*, Issue 1. pp. 195-198.
8. Walt Kester, (2011), *MT-003: Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so You Don't Get Lost in the Noise Floor*, Analog Devices.
9. *AD9850. CMOS, 125 MHz Complete DDS Synthesizer*. Available at [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf)

*Статтю представив д-р техн. наук. проф. ОНАЗ Троцишин І.В.*

*Надійшла (received): 14.02.2018 р.*

Horiashchenko Konstantin, Cand. Tech. Sci, Associate professor  
Khmelnytsky national university, Ukraine  
Str. Institut'ska, 11, Khmelnytsky, Ukraine, 29016  
e-mail: [kstvg@yandex.ua](mailto:kstvg@yandex.ua)  
ORCID ID: 0000-0002-7034-8702

УДК 621.3.095.21:621.3.018

**Горященко К.Л. Моделирование неравномерности спектра сигнала опорного генератора для задач фазовой дальнометрии у середовищі Matlab / К.Л. Горященко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 7 – 15.**

В статті представлені результати дослідження спектрального аналізу сигналів, що складаються з гармонійних сигналів із нецілими періодами. Створено модель генератора опорного сигналу із заданою шириною спектра. Для аналізу застосовано дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). Досліджено зміну спектральних складових при зміні ширини вікна аналізу за рахунок відкидання відліків. Встановлено можливість більш точного визначення спектральних складових сигналу за рахунок накопичення результатів ДПФ. Ил.: 5. Табл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

**Ключові слова:** спектр; модель генератора; генератор опорного сигналу; дискретне перетворення Фур'є.

УДК 621.3.095.21:621.3.018

**Горященко К.Л. Моделирование неравномерности спектра сигнала опорного генератора задач фазовой дальнометрии в среде Matlab / К.Л. Горященко // Вестник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 7 – 15.**

В статье представлены результаты исследования спектрального анализа сигналов, состоящих из гармонических сигналов с нецелой периодами. Создана модель генератора опорного сигнала с заданной шириной спектра. Для анализа применено дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Исследовано изменение спектральных составляющих при изменении ширины окна анализа за счет отбрасывания отсчетов. Установлена возможность более точного определения спектральных составляющих сигнала за счет накопления результатов ДПФ. Ил.: 5. Табл.: 1. Библиогр.: 9 назв.

**Ключевые слова:** спектр; модель генератора; генератор опорного сигнала; дискретное преобразование Фурье.

UDC 621.3.095.21:621.3.018

**Horiaschenko K.L. Modeling of the unevenness of the signal spectrum of the reference oscillator generator for phase-distance problems in the Matlab / K.L. Horiaschenko // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – № 24 (1300). – P. 7 – 15.**

The article presents the results of research the determination of the spectral analysis of signals consisting of harmonic signals with inexpedient periods. The model of the generator of the reference signal with the given width of the spectrum is created. A discrete Fourier transform (DFT) has been used for analysis. The change of the spectral components in the change of the width of the analysis window due to the counting of the samples was studied. The possibility of more precise determination of the spectral components of the signal due to accumulation of the results of DFT is established. Figs.: 5. Tabl.: 1. Refs.: 9 titles.

**Keywords:** spectrum; generator model; reference signal generator; discrete Fourier transform.