

Г.Г. БОРТНИК, М.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, Р.М. ВІТЕР  
Вінницький національний технічний університет

## МЕТОД РОЗШИРЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ДІАПАЗОНУ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ТРАКТІВ ЗАСОБІВ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ

У роботі представлено метод розширення динамічного діапазону аналого-цифрових трактів засобів цифрового оброблення радіосигналів за рахунок цифрової фільтрації вихідних сигналів аналого-цифрового перетворювача. У рамках запропонованого методу отримано вирази для оцінювання нелінійних спотворень сигналів в аналого-цифровому тракті. Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається розширити динамічний діапазон аналого-цифрового тракту на 9 – 7 дБ порівняно з існуючим методом аналогової смугової фільтрації вхідного радіосигналу.

Ключові слова: радіосигнали, аналого-цифровий тракт, аналого-цифровий перетворювач, смугова фільтрація, цифрова фільтрація, динамічний діапазон.

G.G. BORTNYK, M.V. VASYLKYVSKYI, R.M. VITER  
Vinnytsia National Technical University

## EXTENSION METHOD OF DYNAMIC RANGE ANALOG-DIGITAL TRACKS OF DIGITAL MEANS RADIOSIGNAL PROCESSING

The paper presents a method of expanding the dynamic range of analogue-to-digital paths of digital signal processing by digital filtering of the output signals of an analogue-to-digital converter. It is shown that real tracts of analogue-to-digital transformation of radiosignals make significant distortions in the digital representation of signals in the form of parasitic spectral components due to the nonlinearity of the functional elements of analogue-to-digital tracts. In turn, the parasitic components of the spectrum arising in the output signal of the analogue-digital path, lead to a limitation of the dynamic range of the path and, accordingly, the radio-technical system of digital processing of radiosignals. It is established that the filter coefficient of the digital part of the analogue-to-digital path depends on the spectral composition of the output signal of the analogue-to-digital converter. It is proved that when input to the analogue-to-digital path of the harmonic signal as a result of non-linear distortions at its output, odd harmonics of the input signal are formed. As part of the proposed method, expressions were obtained for estimating nonlinear distortions of signals in the analogue-digital path. The structure of the analogue-digital path is developed, according to which the output signal of the analogue-to-digital converter is processed in the digital signal processor (DSP) according to the algorithm of digital filtering. An expression was obtained to determine the filter coefficient of the digital part of the path. The analysis of the efficiency of the proposed method confirmed that thanks to the developed method it is possible to extend the dynamic range of the analogue-digital path by 9 - 7 dB compared to the existing method of analogue bandpass filtering of the incoming radiosignal. The proposed method can be used in telecommunication and radio engineering systems to digitally process radio signals in real time.

Keywords: radiosignals, analogue-to-digital path, analogue-to-digital converter, band-pass filtering, digital filtering, dynamic range.

### Вступ

Засоби цифрового оброблення радіосигналів (РС) є складовою частиною систем інформаційного забезпечення радіотехнічних комплексів різноманітного застосування [1]. Вони призначені для запам'ятовування частотно-часової структури прийнятих РС, видачі даних в системи аналізу цих сигналів та відтворення у заданих проміжках часу оброблених РС [2].

Аналого-цифровий тракт (АЦТ) є одним з найважливіших складових сучасних і перспективних засобів цифрового оброблення РС та в значній мірі визначає їх граничні можливості як за швидкістю, так і за динамічним діапазоном [3]. Тому основну увагу розробники цифрових радіотехнічних систем зосереджують на розширенні динамічного діапазону АЦТ. Однак, використання відомих методів і підходів у покращенні характеристик АЦТ засобів цифрового оброблення РС не дозволяють реалізувати потенційно досяжний динамічний діапазон [2, 3]. Це пояснюється тим, що реальні тракти аналого-цифрового перетворення РС вносять суттєві спотворення в цифрове представлення сигналів у вигляді паразитних спектральних складових, що обумовлені нелінійністю функціональних елементів АЦТ [4]. У свою чергу, паразитні складові спектра, що виникають у вихідному сигналі АЦТ, призводять до обмеження динамічного діапазону тракту і відповідно радіотехнічної системи цифрового оброблення РС.

Таким, чином актуальною задачею є розробка АЦТ з розширеним динамічним діапазоном при збереженні потенційно високої швидкодії засобів цифрового оброблення РС.

**Метою роботи є розширення динамічного діапазону АЦТ засобів оброблення радіосигналів за рахунок цифрової фільтрації вихідних сигналів аналого-цифрового перетворювача РС.**

### Основна частина

Оброблення РС в ідеальній аналоговій частині АЦТ, що не вносить власних шумів і спотворень, може змінити динамічний діапазон за рахунок смугової фільтрації. Така процедура використовується для забезпечення вимог теореми Котельнікова-Шеннона при дискретизації РС в аналого-цифровому перетворювачі (АЦП). Смугова фільтрація повинна виконуватись за умови відсутності спотворень оброблюваних РС. Але смуга пропускання цього фільтра  $\Delta f_{bf}$  може бути вужчою, ніж частотна смуга вхідного РС  $\Delta f_{in}$ . При цьому дисперсія шумів пропорційна смузі пропускання АЦТ. Коефіцієнт фільтрації для ідеальної аналогової частини АЦТ дорівнює

$$Q_{iap} = 10 \log \frac{\Delta f_{in}}{\Delta f_{bf}}. \quad (1)$$

Цей вираз демонструє вигреш у динамічному діапазоні для аналогової частини АЦТ, що не вносить власних спотворень і шумів. Реальні схеми характеризуються втратами  $\alpha_a$  за рахунок додавання власних шумів аналогових вузлів і АЦП. При цьому вираз для коефіцієнта фільтрації реальної аналогової частини АЦТ набуде вигляду

$$Q_{iap} = 10 \log \frac{\Delta f_{in}}{\Delta f_{bf}} - \alpha_a. \quad (2)$$

Коефіцієнт фільтрації цифрової частини АЦТ залежить від спектрального складу вихідного сигналу АЦП. Складність аналізу проходження РС аналого-цифровим трактом полягає в тому, що АЦТ є нелінійним інерційним пристроєм і тому найбільш повна модель повинна враховувати обидві властивості і є складною. Простіша модель полягає в дослідженні АЦТ як безінерційного пристрою, що є допустимим для РС з частотами, що є нижчими граничних частот АЦТ. Якщо аналізуються РС, рівень яких може перевищувати динамічний діапазон АЦТ, тоді його модель повинна враховувати ефект обмеження сигналу. Для РС, рівень яких не досягає межі динамічного діапазону АЦТ, його модель може не враховувати ефект обмеження і завдяки цьому є простішою моделлю АЦТ. Дослідження такої моделі є доцільним, тому що вона дозволяє отримати граничні значення характеристики при такому нелінійному перетворенні.

Проаналізуємо вплив процедури квантування на спектр РС. Для випадку ідеального безінерційного АЦТ його вихідний сигнал представляється у вигляді суми двох характеристик

$$U_{out} = U_l[U_{in}] + U_m[U_{in}], \quad (3)$$

де  $U_l[U_{in}]$  – лінійна амплітудна характеристика АЦТ, що відповідає неспотвореному передаванню РС;

$U_m[U_{in}]$  – нелінійна амплітудна характеристика АЦТ.

Нелінійна характеристика АЦТ є періодичною функцією від вхідного шуму з періодом, що дорівнює кроку квантування  $h$ , тобто

$$U_m[U_{in}] = U_m[U_{in} + i \cdot h], \quad (4)$$

де  $i = \pm 1, \pm 2, \dots$

Модель АЦТ, що ґрунтується на базі виразу (3) представлена на рис. 1.

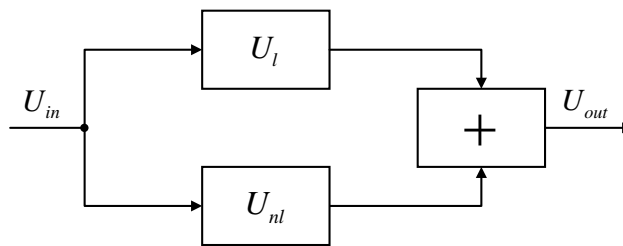


Рис. 1. Модель аналого-цифрового тракту

Нелінійні спотворення в АЦТ згідно рис. 1 представлені колом з характеристикою  $U_m[U_{in}]$ . У даному випадку  $U_m[U_{in}]$  – періодична функція з періодом  $h$ , що має постійну складову  $0,5 \cdot h$ . Ця функція розкладається у ряд Фур'є. Таким чином, нелінійні спотворення в АЦТ можна представити через ряд Фур'є [5]

$$U_m[U_{in}] = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin\left[\frac{2\pi k U_{in}}{h}\right]. \quad (5)$$

Коефіцієнти ряду Фур'є дорівнюють

$$a_k = \frac{1}{h} \int_{-0,5h}^{0,5h} U_m \sin\left[\frac{2\pi k U_{in}}{h}\right] dU_{in} = \frac{h \cdot \cos(\pi k)}{\pi k}. \quad (6)$$

Нелінійна характеристика АЦТ з урахуванням (6) набуде такого вигляду

$$U_m[U_{in}] = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{h \cdot \cos(\pi k)}{\pi k} \sin\left[\frac{2\pi k U_{in}}{h}\right]. \quad (7)$$

Розглянемо процес проходження гармонічного сигналу аналого-цифровим трактом з метою оцінювання нелінійних спотворень в АЦТ. Нехай на вхід АЦТ подається сигнал

$$U_{in}[t] = U_m \cos(\omega t). \quad (8)$$

Підставляємо (8) у вираз (7) і отримаємо вихідні складові АЦТ, що обумовлені нелінійними спотвореннями:

$$\begin{aligned} U_m[t] &= h \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(\pi k)}{\pi k} \sin\left[\frac{2\pi k U_m \cos(\omega t)}{h}\right] = \\ &= h \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(\pi k)}{\pi k} 2 \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m J_{2m+1}\left[\frac{2\pi k U_m}{h}\right] \cdot \cos[(2m+1)\omega t], \end{aligned} \quad (9)$$

де  $J_p(x)$  – функція Бесселя I роду порядку  $p$ .

Таким чином, при подачі на вхід АЦТ гармонічного сигналу в результаті нелінійних спотворень на його виході формуються непарні гармоніки вхідного сигналу ( $\omega, 3\omega$  і т.і.). Отже постає необхідність у

цифровій фільтрації вихідного сигналу АЦП з метою придушення паразитних вищих гармонік сигналу.

Вираз для визначення коефіцієнта фільтрації цифрової частини має вигляд аналогічний виразу (1):

$$Q_{idp} = 10 \log \frac{\Delta f_{bf}^f}{\Delta f_{out}^f} \quad (10)$$

Цей вираз є справедливим для ідеальної реалізації цифрового фільтра РС в АЦТ. Реальні АЦТ вносять деякі втрати  $\alpha_d$  при цифровому обробленні сигналів. При цьому вираз (10) набуде такого вигляду

$$Q_{ndp} = 10 \log \frac{\Delta f_{bf}^f}{\Delta f_{out}^f} - \alpha_d \quad (11)$$

Наявність втрат  $\alpha_d$  обумовлено таким чинником, як вагове зважування (при цьому значення втрат залежать від типу застосованої віконної функції, наприклад, для функції Хеммінга  $\alpha_d = 1,34 \text{ дБ}$ ) [6].

Структура АЦТ, що функціонує на базі запропонованого методу, представлена на рис. 2.

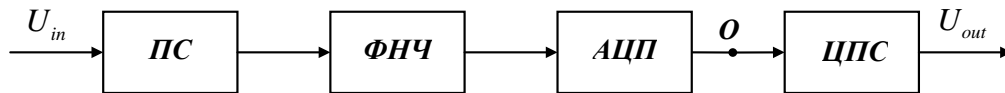


Рис. 2. Структура АЦТ з цифровою фільтрацією вихідного сигналу аналого-цифрового перетворювача

Аналогова частина АЦТ містить послідовно ввімкнені каскади підсилення (ПС) та фільтра нижніх частот (ФНЧ). Вихідний сигнал АЦП обробляється у цифровому процесорі сигналів (ЦПС) за алгоритмом цифрової фільтрації.

#### Аналіз ефективності запропонованого методу

При оцінюванні ефективності методу вважаємо, що динамічний діапазон вхідної аналогової частини АЦТ ширший, ніж динамічний діапазон аналого-цифрового перетворювача. Динамічний діапазон АЦП у робочій смузі частот дорівнює задекларованому у паспортних даних значенню  $D_{ADC}$  [7]. У смузі частот  $\Delta f_{bf}^f$  динамічний діапазон АЦТ з урахуванням коефіцієнта фільтрації в аналоговій частині дорівнює

$$D_{ADT_{af}} = D_{ADC} + 10 \lg \frac{\Delta f_{in}^f}{\Delta f_{bf}^f} - \alpha_a \quad (12)$$

Відомо вираз для динамічного діапазону АЦТ з урахуванням режиму дискретизації сигналів [8]

$$D_{ADT_d} = D_{ADC} + 10 \lg \frac{f_s}{2\Delta f_{bf}^f} \quad (13)$$

де  $f_s$  – частота дискретизації АЦП.

Якщо середньоквадратичне значення власних шумів аналогової частини АЦТ перевищує середньоквадратичне значення шумів АЦП у  $\sqrt{c^2 + 1}$  разів [9], тоді динамічний діапазон тракту в точці  $O$  дорівнює

$$D_{ADT_O} = D_{ADC} + 10 \lg \frac{f_s}{2(c^2 + 1)\Delta f_{bf}^f} \quad (14)$$

Динамічний діапазон на виході АЦТ ширший динамічного діапазону в точці  $O$  на значення коефіцієнта фільтрації цифрової частини:

$$D_{ADT_{df}} = D_{ADC} + 10 \lg \frac{f_s}{2(c^2 + 1)\Delta f_{out}^f} - \alpha_d \quad (15)$$

На рис. 3 представлено залежності динамічного діапазону АЦТ, побудованого на базі 14-розрядного АЦП, від смуги пронормованого за частотою дискретизації радіосигналу для різних випадків фільтрації.

Крива 1 побудована для випадку цифрової фільтрації РС з використанням віконних функцій Хеммінга, а крива 2 – з використанням віконних функцій Кайзера-Бесселя. Нижня крива 3 відповідає АЦТ з аналоговою смуговою фільтрацією РС. Як видно з графіків, динамічний діапазон АЦТ знижується при збільшенні частоти вхідного радіосигналу. При цьому цифрова фільтрація на базі вікна Хеммінга забезпечує найкращі значення динамічного діапазону (82 – 78 дБ залежно від частоти вхідного сигналу). Водночас аналогова фільтрація забезпечує динамічний діапазон АЦТ у межах 75 – 69 дБ.

Таким чином, запропонований метод дає можливість суттєво розширити динамічний діапазон АЦТ засобів цифрового оброблення РС та забезпечити функціонування телекомунікаційних і радіотехнічних систем з широким класом сигналів.

#### Висновки

У роботі представлено метод розширення динамічного діапазону АЦТ засобів цифрового оброблення РС, який базується на процедурі цифрової фільтрації вихідного сигналу АЦП.

Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається розширити динамічний діапазон АЦТ на 9 – 7 дБ порівняно з існуючим методом аналогової смугової фільтрації вхідного РС.

Запропонований метод можна використовувати в телекомунікаційних і радіотехнічних системах для цифрового оброблення радіосигналів у режимі реального масштабу часу.

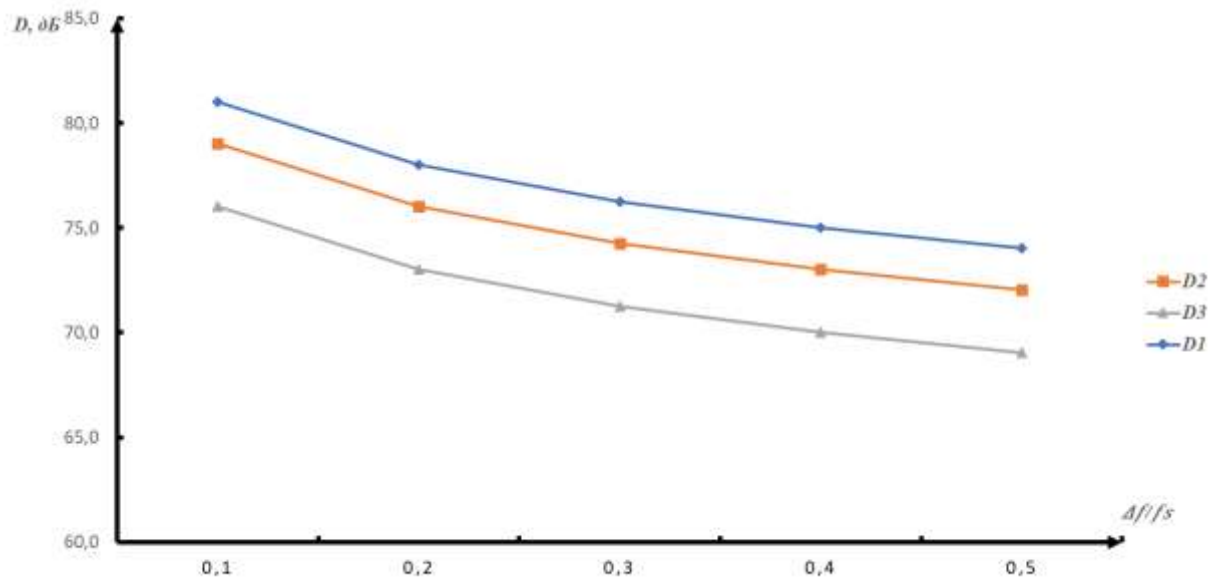


Рис. 3. Залежність динамічного діапазону АЦТ від смуги частот вхідного радіосигналу

### Література

1. Рембовский А.М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин. – М. : Телеком, 2010. – 624 с.
2. Бортник Г.Г. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, В.М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 168 с.
3. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с.
4. Бортник Г.Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, В.М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 128 с.
5. Бортник Г.Г. Дослідження інтегральної нелінійності аналого-цифрового перетворювача у базисі дискретних функцій Фур'є / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 5. – С. 117–119.
6. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Айфичер, Б. Джервис ; пер. с англ. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.
7. Бортник Г.Г. Швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач підвищеної точності / Г.Г. Бортник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 5. – С. 47–50.
8. Бортник Г.Г. Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 2. – С. 82–85.
9. Бортник Г.Г. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів у радіотехнічних комплексах / Г.Г. Бортник, М.Л. Мінов, О.В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – № 2. – С. 12–15.

### References

1. Rembovskij A.M. Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva / A.M. Rembovskij, A.V. Ashihmin, V.A. Kozmin. – M. : Telekom, 2010. – 624 s.
2. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby pervynnoho tsyfrovoho obroblennia radiosyhnaliv / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, V.M. Kychak. – Vinnytsia : VNTU, 2016. – 168 s.
3. Kester U. Analogo-cifrovoe preobrazovanie / Uolt Kester. – M. : Tehnosfera, 2007. – 1016 s.
4. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv / H.H. Bortnyk, S.H. Bortnyk, V.M. Kychak. – Vinnytsia : VNTU, 2013. – 128 s.
5. Bortnyk H.H. Doslidzhennia intehralnoi nelineinosti analoho-tsyfrovoho peretvoriuvacha u bazysi dyskretnykh funktsii Furie / H.H. Bortnyk, S.H. Bortnyk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2005. – № 5. – S. 117–119.
6. Ajficher E. Cifrovaya obrabotka signalov / E. Ajficher, B. Dzhervis ; per. s angl. – M. : Vilyams, 2004. – 992 s.
7. Bortnyk H.H. Shvydkodiuiuchy analoho-tsyfrovyy peretvoriuvach pidvyshchenoi tochnosti / H.H. Bortnyk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2002. – № 5. – S. 47–50.
8. Bortnyk H.H. Prystrii analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, O.V. Stalchenko // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2013. – № 2. – S. 82–85.
9. Bortnyk H.H. Analiz efektyvnosti analoho-tsyfrovoho peretvorennia syhnaliv u radiotekhnichnykh kompleksakh / H.H. Bortnyk, M.L. Minov, O.V. Stalchenko // Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. – 2011. – № 2. – S. 12–15.

Рецензія/Peer review : 10.01.2020 р.

Надрукована/Printed : 14.1.2020 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Осадчук О.В.