

## ПРИСТРІЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ВЧ-СИГНАЛІВ З РОЗШИРЕНИМ ДИНАМІЧНИМ ДІАПАЗОНОМ

*У роботі представлено пристрій аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з розширеним динамічним діапазоном, який побудовано базі запропонованого модифікованого методу перетворення з додаванням додаткового шуму. Доведено, що цей пристрій характеризується широким динамічним діапазоном при високих значеннях нелінійності характеристики перетворення АЦП.*

*Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, високочастотні сигнали, динамічний діапазон.*

G.G. BORTNYK, O.G. BORTNYK, M.V. VASYLKIIVSKIY, N.O. PUNCHENKO

Vinnitsa National Technical University, Ukraine

### DEVICE ANALOG-DIGITAL CONVERSION OF HF-SIGNALS WITH HIGH DYNAMIC RANGE

*A modified method of analog-to-digital conversion of high-frequency signals with the addition of additional noise-like effect. It is proposed to the input signal with a given band multifrequency added noise signal. However, the additional noise frequency spectrum is outside the frequency range of the signal and the amplitude of the noise signal exceeds the value of the quantization step analog-to-digital converter.*

*The analysis of the dynamic range of the proposed method, which showed that depending on the nonlinearity of ADC been expanding its dynamic range  $6 \pm 16$  dB compared with analog-to-digital converters that do not use additional noise or use low-noise signal.*

*On the basis of the modified method proposed device structure built analog-to-digital conversion of high-frequency signals into account the complexity of implementing the criteria.*

*Key words: analog-digital converter, high-frequency signals, dynamic range.*

#### Вступ

Пристрої аналого-цифрового перетворення сигналів є обов'язковими компонентами комп'ютерних систем загального та спеціального призначення. Проблема розробки та проектування аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) з розширеним динамічним діапазоном є однією з найактуальніших проблем комп'ютерної техніки, від вирішення якої безпосередньо залежать експлуатаційно-технічні показники різновидів комп'ютерних систем: інформаційно-вимірювальних і контрольно-діагностичних систем, складних обчислювальних комплексів та систем керування неперервними процесами. Тобто, ефективність практичного використання сучасних комп'ютерних систем і компонентів у різних галузях визначається рівнем і перспективами розвитку таких АЦП, які є перетворювачами форми інформації та здійснюють у широкому динамічному діапазоні перетворення неперервної форми представлення інформації у дискретну форму.

Традиційно проблема розширення динамічного діапазону АЦП вирішувалася і частково вирішується як за рахунок застосування більш досконалої елементної бази, так і за рахунок введення надлишковості на різних рівнях проектування систем і компонентів: інформаційному, структурно-схемотехнічному та функціонально-алгоритмічному. Пристрої аналого-цифрового перетворення з розширеним динамічним діапазоном як новий напрямок техніки перетворення інформації сформувався у 70-х – 80-х роках минулого століття. У його розвиток великий вклад внесли як вітчизняні, так і зарубіжні вчені [1-3].

Незважаючи на ряд вже вирішених питань, при застосуванні пристроїв аналого-цифрового перетворення сигналів з покращеними параметрами існує ще багато проблем, які стримують широке використання АЦП в комп'ютерних системах. А саме: обмежений динамічний діапазон у смузі високих частот вхідних сигналів (від 10 МГц і вище), недостатньо розроблені теоретичні аспекти та методи аналого-цифрового перетворення з коригуванням нелінійності, що спричиняє обмеження ефективної розрядності АЦП. Ці проблеми пов'язані як з відсутністю необхідної елементної бази, так і зі складністю процесів аналого-цифрового перетворення змінних у часі високочастотних (ВЧ) сигналів, математичний опис яких у часовому і частотному вимірі є досить складним. Таким чином, сучасна схемотехніка АЦП не забезпечує реалізації потенційного динамічного діапазону, що обмежує ефективність використання комп'ютерних систем у радіолокації, цифровому зв'язку та телебаченні, авіакосмічних засобах цифрового оброблення сигналів [4].

На основі вищевикладеного актуальною задачею є розвиток теоретичних основ для розробки нових пристроїв аналого-цифрового перетворення з високою лінійністю, які дозволяють виконувати перетворення складних сигналів у смузі високих частот і характеризуються широким динамічним діапазоном.

**Метою роботи** є розробка пристрою аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів, що характеризується широким динамічним діапазоном.

Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- удосконалити метод аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням додаткового шумоподібного впливу;
- виконати аналіз ефективності модифікованого методу
- розробити структуру пристрою аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів.

#### Модифікований метод аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів

У роботі пропонується до вхідного ВЧ-сигналу із заданою смугою додавати шумовий сигнал,

спектр частот якого знаходиться за межами частотного діапазону вхідного сигналу. З метою підвищення ефективності коригування нелінійності характеристики перетворення АЦП необхідно як додатковий псевдовипадковий вплив, використовувати багаточастотний сигнал. Густина ймовірності чотиричастотного сигналу відображає криву подібну до гауссового процесу, незважаючи на те, що окремі синусоїди характеризуються зовсім іншою густиною ймовірності. Цей сигнал є оптимальним типом додаткового шумоподібного сигналу АЦП, який, з одного боку, дає змогу просто формувати необхідну частотну смугу, а з іншого – реалізується шляхом використання широкої номенклатури стандартних генераторів синусоїдальних сигналів з нормованими характеристиками [4].

В пристроях аналого-цифрового перетворення використовуються імпульсні сигнали дискретизації, для яких поблизу частоти Найквіста, що дорівнює  $0,5f_s$ , існує смуга частот, що називається захисним частотним інтервалом. Наявність на частотній осі захисного інтервалу обумовлена необхідністю розмежування паразитних і корисних складових дискретизованого сигналу, а також неможливістю реалізації аналогових фільтрів з ідеальними амплітудно-частотними характеристиками прямокутної форми. Ця вільна від вхідного сигналу частотна смуга може використовуватись для додаткового шумового сигналу. Ширина цієї частотної смуги

$$\Delta f = 0,5f_s - f_m, \quad (1)$$

де  $f_m$  – максимальна складова у спектрі вхідного сигналу.

Для уникнення ефекту накладання спектрів, смуга частот додаткового шумового сигналу повинна бути на 10% відсотків вужчою від вільної смуги частот, тобто

$$\Delta f_{dn} = 0,9(0,5f_s - f_m). \quad (2)$$

На рис. 1 наведено спектри вхідного та додаткового шумового сигналу АЦП, що представлено чотиричастотним коливанням.

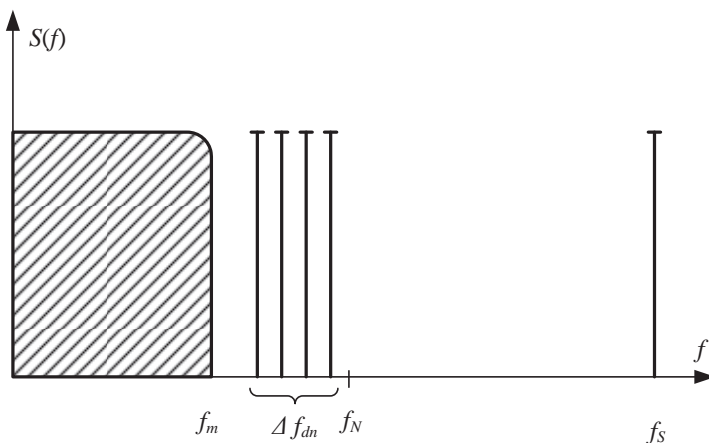


Рис. 1. Спектри вхідного та додаткового шумового сигналу пристрою аналого-цифрового перетворення

Тоді амплітуда додаткового шумоподібного сигналу

$$U_{dn} = 0,5U_{fs} \left( 1 - \frac{U_s}{U_m} \right). \quad (3)$$

Підвищення амплітуди додаткового шумового сигналу на вході АЦП до значень  $U_{dn} > q$  дозволить виконати усереднення нелінійності характеристики перетворення АЦП.

#### Аналіз ефективності модифікованого методу аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів

Проаналізуємо ефективність запропонованого методу додавання додаткового шумового сигналу з подальшою його компенсацією на виході АЦП. Динамічний діапазон АЦП, що обмежується нелінійністю характеристики перетворення та з урахуванням потужності шумів квантування, характеристики вхідного сигналу через пік-фактор  $k$  та режиму дискретизації АЦП [5]

$$D = 6n - 20 \lg k + 4,8 - 20 \lg \left( 1 + \frac{3\delta}{q} \right) + 10 \lg \frac{f_s}{2f_{in}}. \quad (4)$$

Уведемо у вираз (4) додатковий шум

$$D = 20 \lg \frac{U_{in} - U_{dn}}{U_{fs}} + 6n - 20 \lg k + 4,8 - 20 \lg \left[ 1 + E \left( \frac{3\delta}{q} \right) \right] + 10 \lg \frac{f_s}{2f_{in}}. \quad (5)$$

На рис. 2 наведено залежності динамічного діапазону від нелінійності для різного співвідношення між частотою вхідного сигналу та частотою дискретизації.

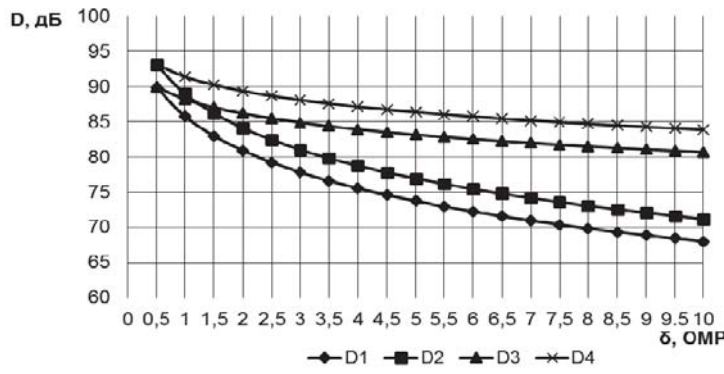


Рис. 2. Залежність  $D = f(\delta)$  для різного співвідношення  $\frac{f_s}{2f_{in}}$  ( $\frac{f_s}{2f_{in}} = 1$ ).

Тут спостерігаються дещо нижчі значення динамічного діапазону (90÷80 дБ). АЦП без додаткового шумового сигналу за таких же умов дискретизації демонструє звуження динамічного діапазону від 93 до 68 дБ, що є неприйнятним для використання таких перетворювачів у сучасних комп'ютерних системах з ЦОС.

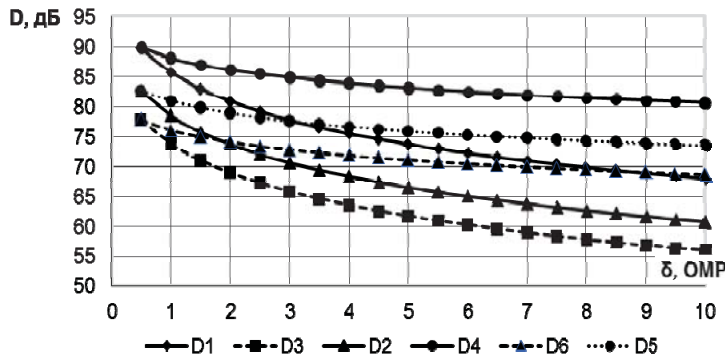


Рис. 3. Залежність  $D = f(\delta)$  для різних типів і амплітуд вхідних сигналів

Слід зазначити, що при функціонуванні АЦП з рівнем  $U_{in} = 0,25U_{fs}$ , звужується динамічний діапазон на 12 дБ. Тому потрібно дотримуватись повного охоплення шкали квантування вхідним сигналам АЦП.

Підсумовуючи результати аналізу запропонованого модифікованого методу аналого-цифрового перетворення з додатковим шумом, можна стверджувати, що псевдовипадковий шум дає ефект розширення динамічного діапазону АЦП.

### Структура пристрою аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів

Особливості структури пристрою аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів залежать від типу елементної бази, яка застосовується в тракці. Елементну базу формують мікропроцесори, ІМС загального призначення та програмовані логічні матриці (ПЛМ). Внаслідок функціонування АЦП у смузі високих тактових частот, мікропроцесори для їх реалізації не використовуються. Ефективність побудови АЦП визначається критерієм складності  $C$ , тобто кількістю ІМС, необхідних для реалізації пристрою із заданими технічними характеристиками.

На рис. 4 наведені характерні залежності складності реалізації пристрою на базі ІМС загального призначення  $C_{MTA}$  та ПЛМ  $C_{SLM}$  від розрядності АЦП.

Дискретний характер приросту функцій пояснюється дискретним характером розрядності АЦП. Ці графіки можна апроксимувати лінійними залежностями, що описуються виразами:

$$\begin{cases} C_{MTA} = n \cdot C_{1MTA} \\ C_{SLM} = C_{OSLM} + n \cdot C_{1SLM} \end{cases}, \quad (6)$$

де  $C_{OSLM}$  – початкова складність реалізації на базі ПЛМ, що залежить від числа розрядів;

$C_{1MTA} \cdot C_{1SLM}$  – приріст складності при збільшенні розрядності АЦП на 1 біт.

Для малої розрядності виконується нерівність  $C_{MTA} < C_{SLM}$ .

Дві верхні криві отримано для АЦП з додатковим шумом, причому найширший динамічний діапазон спостерігається за умови

$$\frac{f_s}{2f_{in}} = 2,1.$$

У межах зміни нелінійності від 0,5 до 10 ОМР динамічний діапазон зменшується від 93 до 84 дБ, залишаючись на досить високому рівні. Нижня крива з додатковим шумом побудована для теоретичного випадку, тобто

$$\left( \frac{f_s}{2f_{in}} = 1 \right).$$

На рис. 3 наведено залежності динамічного діапазону від нелінійності ХП АЦП для різних типів і амплітуд вхідних сигналів.

Нижні криві характеризують динамічний діапазон АЦП без додаткового шумового сигналу для багатоканального широкосмугового сигналу ( $k = 4$ ) та рівня вхідного сигналу  $U_{in} = 0,25U_{fs}$ . Верхні криві відповідають роботі АЦП для цих же режимів, але з додатковим шумом, при цьому спостерігається розширення динамічного діапазону на 6÷14 дБ.

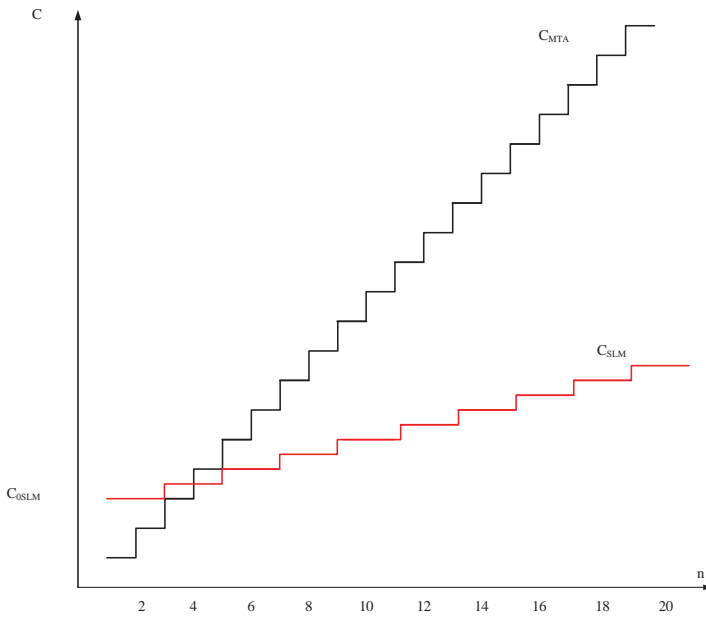


Рис.4. Залежність складності реалізації АЦТ від числа розрядів

Зі зростанням числа розрядів завжди є така розрядність  $n_c$ , вище якої виконується нерівність  $C_{SLM} < C_{MTA}$ , тобто АЦП на базі ІМС загального призначення стає складнішим, ніж АЦП на базі ПЛМ. З урахуванням (6), отримаємо

$$n_c = \frac{C_{OSLM}}{C_{1MTA} + C_{1SLM}}. \quad (7)$$

Цей вираз визначає таке число розрядів, вище якого застосування ПЛМ в пристрої аналого-цифрового перетворення є ефективнішим, ніж ІМС загального призначення. Таким чином, оптимізація пристрою аналого-цифрового перетворення на базі ПЛМ полягає в мінімізації величини  $C_{OSLM}$  при забезпеченні необхідних показників пристрою (динамічний діапазон, смуга

робочих частот). На етапі розроблення узагальненої структури пристрою аналого-цифрового перетворення величини  $C_{OSLM}$ ,  $C_{1MTA}$ ,  $C_{1SLM}$  невідомі, а при переході до оригінальної схеми можна отримати числові значення початкової складності реалізації та приростів складності.

На базі розробленого модифікованого методу аналого-цифрового перетворення сигналів з додатковим шумом та з урахуванням запропонованого критерію складності, розроблено структуру пристрою аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів, що наведена на рис. 4.

У цій структурі з виходу формувача багаточастотного шумоподібного сигналу (ФБШС) додатковий сигнал в аналоговій формі  $U_{dn}$  через ЦАП подається на один з входів аналогового суматора (АС), а в цифровій формі  $Q_{dn}$  через буферний регістр (БР) цей же сигнал подається на одну з шин цифрового віднімача (ЦВ).

Суміш вхідного та додаткового сигналів через буферний підсилювач БП подається на вхід АЦП і перетворюється за допомогою АЦП у цифровий код  $Q_r$ . На виході ЦВ формується різниця  $Q_r - Q_{dn}$ , а в блоці цифрової фільтрації (БЦФ) виконується подавлення частотних складових шумоподібного сигналу. Вихідна шина БЦФ є виходом пристрою аналого-цифрового перетворення, на якому формується скоригований вихідний сигнал  $Q_c$ .

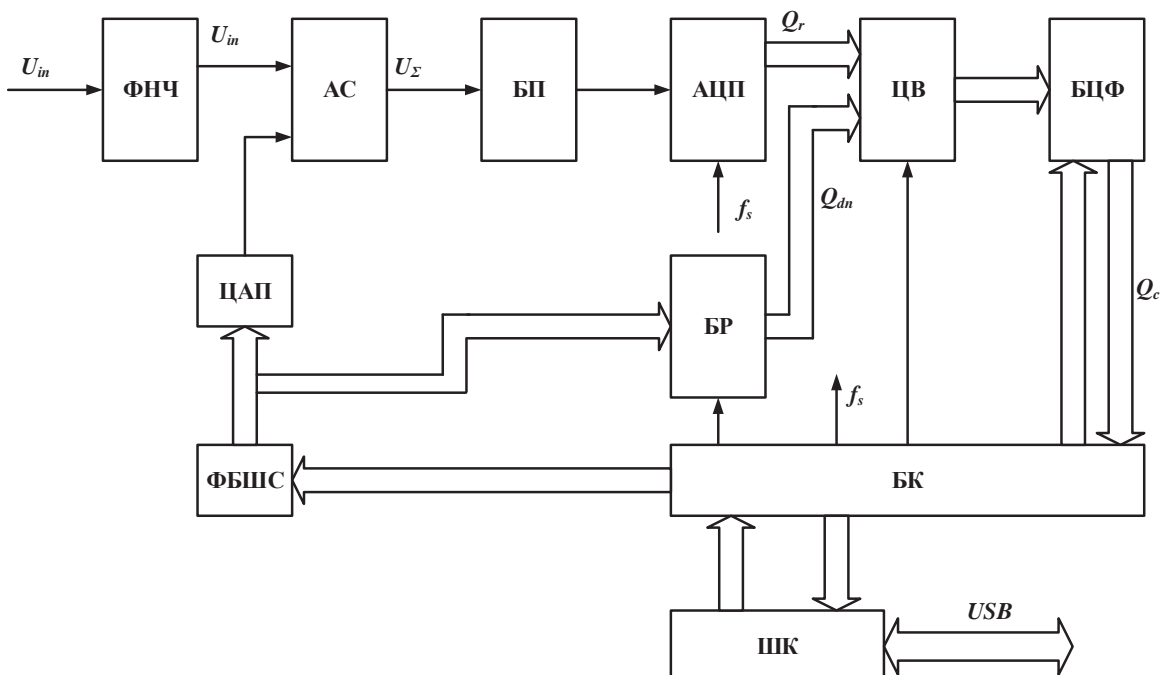


Рис. 4. Структура пристрою аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додатковим шумоподібним сигналом

### Висновки

Розроблено модифікований метод аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додаванням додаткового шумоподібного впливу. При цьому пропонується до вхідного сигналу із заданою смугою додавати багаточастотний шумовий сигнал. Водночас, спектр частот додаткового шуму знаходиться за межами частотного діапазону корисного сигналу і амплітуда цього шумового сигналу перевищує значення кроку квантування аналого-цифрового перетворювача.

Виконано аналіз динамічного діапазону для запропонованого методу, який показав, що залежно від рівня нелінійності характеристики перетворення АЦП спостерігається розширення його динамічного діапазону на 6-16 дБ порівняно з аналого-цифровими перетворювачами, які не використовують додаткового шуму чи застосовують низькорівневий шумовий сигнал.

На базі запропонованого модифікованого методу побудовано структуру пристрою аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з урахуванням критерію складності реалізації.

### Література

1. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с. – ISBN 5-8459-0710-1.
2. 2 Кондалев А.И. Преобразователи формы информации с обработкой данных / В.А. Багацкий, Ю.М. Грешищев, А.И. Кондалев, В.А. Фабричев. – К.: Наукова думка, 1992. – 264 с.
3. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование : пер. с англ. / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с. – ISBN 978-5-94836-146-8.
4. 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. – ISBN 978-966-641-537-3.
5. Бортник Г.Г. Метод аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додатковим шумоподібним сигналом / Г.Г. Бортник, О.В. Стальченко, К.О. Боярський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 1. – С.100-105.

### References

1. Ayficher E.S. Cifrovay obrabotka signalov / E.S. Ayficher, B.W. Jervis. – М.: Williams, 2008. – 992 p.
2. 2. Kondalev A.I. Preobrazovateli formu informacii s obrabotkoy dannuh / V.A. Bagackiy, U.M. Greshischev, A.I. Kondalev, V.A. Fabrichev. – К.: Naukova dumka, 1992. – 264 p.
3. Kester W. Analogo-cifrovoye preobrazovsnie / Walt Kester. – М.: Technosphere, 2007. – 1016 p.
4. Bortnyk G.G. Metodu ta zasobu analogo-cifrovogo peretvoreny vusokochastotnih signaliv / G.G. Bortnyk, S.G. Bortnyk, V.M. Kuchak. – Vinnytsya: VNTY, 2013. – 128 p.
5. Bortnyk G.G. Metod analogo-cifrovogo peretvoreny vusokochastotnih signaliv z dodatkovum shumopodibnum signalom/ G.G. Bortnyk, O.V. Stalchenko, K.O. Boyskey // Vumiruvalna ta obchusluvalna tehnika v tehnologichnih procesax – 2015. – № 1. – P. 100-105.

Рецензія/Peer review : 20.5.2015 р.

Надрукована/Printed : 20.6.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією