

УДК 621.396

Г.Г. БОРТНИК, М.Л. МІНОВ, О.В. СТАЛЬЧЕНКО

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ У РАДІОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ**

**Анотація.** У роботі розроблено критерії ефективності швидкодіючих аналого-цифрових перетворювачів, що можуть застосовуватись в радіотехнічних комплексах. Виконано аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення радіосигналів, в результаті якого можна стверджувати, що використання швидкодіючих аналого-цифрових перетворювачів дає можливість реалізувати цифрові радіотехнічні комплекси на базі методології цифрового оброблення радіосигналів, що створює умови для підвищення точності та розширення функціональних можливостей сучасних комплексів.

**Ключові слова:** аналого-цифрові перетворювачі, цифрова обробка сигналів, радіотехнічні комплекси.

**Аннотация.** В работе разработаны критерии эффективности быстродействующих аналого-цифровых преобразователей, которые могут применяться в радиотехнических комплексах. Выполнен анализ эффективности аналого-цифрового преобразования радиосигналов, в результате которого можно утверждать, что использование быстродействующих аналого-цифровых преобразователей дает возможность реализовать цифровые радиотехнические комплексы на базе методологии цифровой обработки сигналов, что создает условия для повышения точности и расширения функциональных возможностей современных комплексов.

**Ключевые слова:** аналого-цифровые преобразователи, цифровая обработка сигналов, радиотехнические комплексы.

**Annotation.** The criteria of efficiency of fast-acting analog-digital converteres which can be used in radio engineerings complexes are in-process developed. The analysis of efficiency of analog-digital transformation of radiosignals, as a result of which it is possible to assert that the use of fast-acting analog-digital converteres is given by possibility to realize digital radioengineerings complexes on the base of methodology of digital treatment of radiosignals, which creates terms for the increase of exactness and expansion of functional possibilities of modern complexes, is executed.

**Keywords:** analog-digital converters, digital signal processing, radioengineerings complexes.

**Вступ**

Протягом останніх років спостерігається загальна тенденція розвитку радіотехніки та зв'язку, спрямована на перехід від аналогової до цифрової обробки сигналів (ЦОС). Стрімкий розвиток мікроелектронної цифрової та аналого-цифрової елементної бази та поява нових компонентів змінює структуру радіотехнічного тракту, а саме ті частини радіотехнічних пристроїв і систем, які традиційно реалізовувались на базі аналогових методів обробки, будуються на базі ЦОС. Таким чином, відбувається проникнення цифрової методології обробки сигналів у радіотехнічні вузли, які раніше вважались виключно аналоговими, тобто спостерігається наближення ЦОС до лінійного тракту (хвилеводів, антен, коаксіальних кабелів).

Останнім часом, у зв'язку з бурхливим розвитком цифрової компонентної бази, яка інтенсивно нарощує свої можливості за швидкодією, з'явилися реальні можливості її використання для створення цифрових радіотехнічних комплексів (РТК). Для реалізації цифрового приймання радіосигналів у заданій смузі частот обов'язковим є наявність аналого-цифрового перетворювача (АЦП) [1].

Для оцінювання якості цифрових РТК можна використовувати різноманітні критерії ефективності функціонування. Зараз при розробці та експлуатації РТК використовують інформаційні, енергетичні, оперативнотактичні та військово-економічні критерії ефективності [2]. Але вказані критерії розроблені для аналогової техніки і тому вони не дають можливості врахувати особливості аналого-цифрового перетворення сигналів в РТК. На даний час для цифрових РТК загальноприйнятих критеріїв ефективності аналого-цифрового перетворення не розроблено [3].

**Мета роботи та постановка задач**

Метою роботи є розробка критеріїв ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів РТК, що дає можливість підвищити точність цифрового оброблення радіосигналів та розширити функціональні можливості сучасних РТК.

Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати основні чинники, що впливають на спотворення радіосигналів у результаті аналого-цифрового перетворення;
- розробити критерії ефективності швидкодіючих АЦП, що можуть застосовуватись в РТК;
- виконати аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення радіосигналів.

**Розв'язання задач**

Основні недоліки цифрових РТК, пов'язані зі спотворенням прийнятих аналогових радіосигналів, обумовлені дискретизацією та квантуванням сигналів, помилками у формуванні цифрового і аналогового представлення модульовальної функції та її спектра.

Суттєвий внесок у спотворення сигналів вносить АЦП, який є нелінійним пристроєм. АЦП породжує специфічні шуми квантування, обумовлені ступінчастою амплітудною характеристикою та шуми обмеження, які виникають при перевищенні миттєвими значеннями прийнятого сигналу

$u_r(t)$  максимальних рівнів даного АЦП. Вихідний відлік АЦП в  $i$ -й момент часу дорівнює сумі істинного значення вхідного сигналу  $u_r(i)$ , шуму квантування  $u_{cn}(i)$ , зовнішнього та внутрішнього шумів приймача  $n(i)$  та шуму обмеження АЦП  $u_{en}(t)$

$$u(i) = u_r(i) + n(i) + u_{cn}(i) + u_{en}(i). \quad (1)$$

Відліки  $n(i)$  відображають не лише внутрішні шуми приймача та шуми антени, але й будь-які зовнішні завади, що діють на приймач РТК в  $i$ -й момент часу.

Для квазілінійної моделі АЦП вважають, що шум квантування  $u_{cn}(t)$  є випадковим процесом, некорельованим з вхідним сигналом  $u_r(t)$  та шумом  $n(i)$ . До такого ж класу можна виділити шум обмеження, який виникає при перевищенні вхідного сигналу АЦП його максимального рівня  $u_{\max}$ . Але при значній інтенсивності шумів приймача РТК, що виникають під дією зовнішніх та внутрішніх чинників, усі сигнали на вході АЦП стають корельованими між собою. Сама амплітудна характеристика АЦП спотворюється за рахунок статистичної лінеаризації нелінійності. Тому за умов великого рівня шумів АЦП при оцінюванні ефективності цифрових РТК необхідно використовувати нелінійні методи статистичного аналізу.

Відомо, що рівень шумів квантування АЦП залежить від кроку квантування  $h$ . Якщо значення відліків  $u_{cn}(i)$  шуму квантування некорельовані один з одним і відліками  $n(i)$  вхідного шуму, то дисперсія шуму квантування дорівнює [4]

$$\sigma_c^2 = \frac{h^2}{12}. \quad (2)$$

Якщо рівень вхідного сигналу знаходиться у межах динамічного діапазону АЦП, то дисперсія еквівалентного шуму дорівнює

$$\sigma_e^2 = \frac{h^2}{12} + \sigma_n^2, \quad (3)$$

де  $\sigma_n^2$  – дисперсія внутрішніх та зовнішніх шумів приймача.

З виразу (3) видно, що дисперсія еквівалентного шуму зростає лінійно разом зі зростанням інтенсивності шумів квантування та приймача.

Обмеження вхідного сигналу  $u_r(t)$  в АЦП внаслідок нелінійності його амплітудної характеристики призводить до виникнення шумів обмеження. Їх інтенсивність залежить від порогу обмеження  $u_{\max}$ . При збільшенні динамічного діапазону АЦП рівень шумів обмежується і при  $\frac{u_{\max}}{\sigma_e} > 3$  шуми обмеження незначно спотворюють цифровий еквівалент вхідного аналогового сигналу.

Дисперсія шумів квантування  $\sigma_c^2$  при заданому діапазоні змінювання миттєвих значень сигналу лінійно зменшується зі збільшенням числа розрядів АЦП  $m$ .

Однією з найважливіших характеристик РТК є динамічний діапазон, який залежить від рівня обмеження  $u_{\max}$ . Спотворення вхідного сигналу РТК за малої інтенсивності шумів пов'язані головним чином з рівнем обмеження  $u_{\max}$  і кроком квантування  $h$ . Існує протиріччя між прагненням зменшити крок квантування  $h$  і збільшенням рівня обмеження  $u_{\max}$ . З одного боку, зменшення кроку квантування  $h$  підвищує точність відтворення вхідного сигналу, а з іншого – призводить до відносного зростання впливу шумів приймача  $\sigma_n^2$ . Водночас збільшення порогу  $u_{\max}$  при збереженні розрядності АЦП супроводжується зростанням шумів квантування  $\sigma_c^2$  або при зростанні числа розрядів призводить до ускладнення АЦП.

Нехай відносна дисперсія шуму квантування дорівнює  $\delta_c = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_e^2}$  а відносна дисперсія шуму обмеження –  $\delta_l = \frac{\sigma_l^2}{\sigma_e^2}$  Тоді залежності вказаних вище відносних дисперсій від пронормованого рівня обме-

ження  $\frac{u_{\max}}{\sigma_e}$  для числа розрядів  $m=6$  і  $m=8$  можна представити у вигляді графіків, наведених на рис.1.

Як видно з графіків інтенсивність відносного сумарного шуму  $\delta_e = \delta_c + \delta_l$  має нечітко виражений мінімум при  $\frac{u_{\max}}{\sigma_e} = 3 \div 3,5$ . Тому, вибір оптимального динамічного діапазону АЦП, з урахуванням графіків на рис.1 та виразу  $u_{\max} = h \cdot 2^{m-1}$ , буде здійснюватись з умови

$$h \cdot 2^{m-1} = (3 \div 3,5) \cdot \delta_l. \quad (4)$$

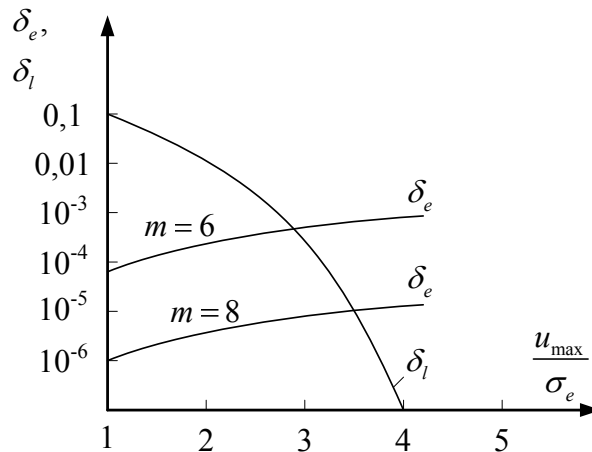


Рисунок 1 – Залежність відносних дисперсій шуму від діапазону зміни рівня обмеження

У випадку вхідного сигналу, який характеризується нормальним законом розподілу, сумарна відносна дисперсія шумів квантування і обмеження приблизно дорівнює 0,001 (для 6-розрядного АЦП) або 0,00001 (для 8-розрядного АЦП).

Для оцінювання якості відтворення сигналу цифровим РТК доцільно використовувати інформаційний критерій подібності, який дозволяє оцінювати, ступінь відмінності відновленого сигналу  $u_p(t)$  від прийнятого сигналу  $u_r(t)$ . Чисельно інформаційний критерій може бути представлений коефіцієнтом взаємної кореляції

$$R(\tau) = \frac{\langle u_r(t) \cdot u_p(t) \rangle}{\sigma_r \cdot \sigma_p}, \quad (5)$$

де  $\sigma_r, \sigma_p$  – середньоквадратичні значення вхідного та відтвореного сигналів.

Час кореляції  $\tau_k$  сигналів  $u_r(t)$  і  $u_p(t)$  визначається як  $\tau_k = 0,5 \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) d\tau$ . Значення  $\tau_k$  може

слугувати грубою оцінкою якості відтворення сигналу  $u_r(t)$ . Якщо  $\tau_k \geq T_V$ , де  $T_V$  – час накопичення реалізацій сигналу в РТК, то відтворений сигнал на виході задовольняє умовам критерію якості. Значення  $R(\tau)$  залежить від шумів квантування і обмеження, а при оптимальному виборі  $u_{\max}$  залежить від розрядності АЦП. При розробці цифрових РТК прагнуть максимально послабити потужність паразитних складових у спектрі прийнятого сигналу. Оцінку рівня паразитних складових у спектрі сигналу можна знайти за допомогою коефіцієнта енергетичних втрат

$$\beta_p = \frac{P_n}{P_o}, \quad (6)$$

де  $P_n$  – потужність максимальної за інтенсивністю бічної паразитної складової спектра сигналу;

$P_o$  – потужність основної корисної складової спектра сигналу.

На рис.2. представлено залежності інформаційного та енергетичного критеріїв якості від числа розрядів АЦП.

Як видно з графіків при  $m \geq 5$  розрядів прийнятий цифровим РТК сигнал відтворюється з високою достовірністю. Цей випадок добре узгоджується з наведеними вище твердженнями про вплив власних шумів та динамічного діапазону АЦП на значення дисперсії сумарних завад на виході АЦП. Так, при 6-розрядному аналого-цифровому перетворенні паразитні складові знаходяться нижче рівня  $-30$  дБ. Тобто, використання 6-розрядних надшвидкодійних АЦП дає змогу відтворити з високою точністю сигнали в цифрових РТК.

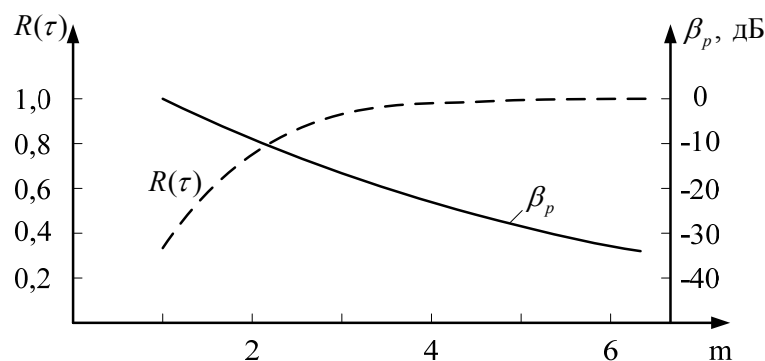


Рисунок 2 – Залежності інформаційного та енергетичного критеріїв ефективності від розрядності АЦП

#### Висновки

1. Запропоновано як критерій ефективності АЦП інформаційний критерій подібності, який дозволяє оцінювати, ступінь відмінності відновленого сигналу на виході РТК від прийнятого аналогового сигналу.
2. Для оцінювання рівня паразитних складових у спектрі сигналу на виході РТК запропоновано використовувати коефіцієнт енергетичних втрат, який враховує потужність максимальної за інтенсивністю бічної паразитної складової спектра та потужність основної корисної складової спектра сигналу.
3. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення радіосигналів дає змогу стверджувати, що використання швидкодійних АЦП дає можливість реалізувати цифрові РТК на базі методології цифрового оброблення радіосигналів, що створює умови для підвищення точності та розширення функціональних можливостей сучасних РТК.

#### Список використаної літератури

1. Радзиевский В.Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки./ В.Г. Радзиевский, А.А. Сирота. – М.: Радиотехника, 2004. – 432с. ISBN 5-93108-067-8.
2. Брагин А.Л. Основы метрологического обеспечения аналого-цифровых преобразователей электрических сигналов/ А. А. Брагин, А. Л. Семенюк. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 164с.
3. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов/ М. М Гельман. – М.: Мир, 1999. – 559 с.
4. Руднев П.И. Динамические параметры аналого-цифровых преобразователей и методы их измерений/ П.И.Руднев, Б.А.Хаджи, В.Ю.Чернышев// Радиотехника и электроника. – 1993. – № 10. – С.1968-1876.

#### Відомості про авторів

**Бортник Геннадій Григорович** – к.т.н., доцент кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м.Вінниця, 21021, тел.59-86-74, bgen88@gmail.com.

**Мінов Михайло Леонідович** – аспірант кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м.Вінниця, 21021, тел.59-86-74.

**Стальченко Олександр Володимирович** – асистент кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м.Вінниця, 21021, тел.59-86-74.