

**СПЕКТРАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

У роботі представлено спектральний метод оцінювання динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), що базується на багатопланному обробленні вихідного сигналу АЦП. Доведено, що запропонований метод характеризується високою ефективністю оцінювання динамічних параметрів АЦП за рахунок покращання роздільної здатності та статистичної стійкості оцінки результатів оброблення.

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, спектр сигналу, динамічні параметри.

G.G. BORTNYK, M.V. VASYLKYVSKIY, O.G. BORTNYK
Vinnitsa National Technical University, Ukraine

SPECTRAL METHOD OF EVALUATION OF DYNAMIC PARAMETERS ANALOG TO DIGITAL CONVERTER

A spectral method for evaluating of dynamic parameters of the analog-to-digital converter (ADC) based on multi-sample processing signal converter.

Analysis of spectral efficiency evaluation method allowed to argue that the best performance is characterized by the proposed method with 75% m overlapping segments processed, which compared with the classical method can reduce the variance estimation spectral power density output ADC 2,1 ÷ 3,6 times.

Analysis of the resolution showed that spectral estimation by the proposed method is performed with distinction frequency, which is 3 times higher than for the classical method.

Implementation of spectral estimation procedures using basic discrete Fourier transform reduces computational complexity of the proposed method.

Key words: analog-digital converter, spectrum signal, dynamic parameters.

Вступ

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є обов'язковими компонентами сучасних засобів з цифровим обробленням сигналів (ЦОС) [1, 2]. У процесі розробки, виробництва та експлуатації АЦП виконується великий комплекс контрольно-вимірювальних робіт для забезпечення якості функціонування перетворювачів. Проблеми дослідження поведінки АЦП в статичному режимі функціонування достатньо добре вивчені й питання контролю статичних параметрів перетворювачів ґрунтовно розроблені. Це підтверджується існуванням інформативної системи статичних параметрів АЦП, для яких визначені методики контролю їх параметрів, а також розроблені відповідні засоби для одержання числових значень цих параметрів [2, 3].

Динамічні параметри є специфічними для процесу аналого-цифрового перетворення, тому що вони пов'язані з дискретизацією та квантуванням неперервних сигналів і не мають під собою адекватної метрологічної основи. АЦП є нелінійними та інерційними пристроями, внаслідок чого побудова їх динамічних моделей і знаходження повних динамічних характеристик достатньо складна та до теперішнього часу нерозв'язана задача [4].

В останні роки дослідження та виробництво АЦП з покращеними динамічними параметрами стримуються відсутністю ефективних методів оцінювання динамічних параметрів АЦП у широкій смузі частот. Існуючі методи визначення параметрів АЦП характеризуються низькими роздільною здатністю та статистичною стійкістю результатів оцінювання динамічних властивостей перетворювачів. А це не дозволяє розв'язати широке коло задач, пов'язаних з використанням АЦП у динамічному режимі. Тому дуже часто зразки АЦП вибираються необґрунтовано, без урахування їх реальних динамічних властивостей, що призводить до помилкових результатів та технічних рішень [2].

На основі вищевикладеного актуальною задачею є розробка методів оцінювання динамічних параметрів АЦП, які дозволяють виконувати дослідження перетворювачів аналог-код у широкій смузі частот і характеризуються високою роздільною здатністю та статистичною стійкістю отриманих результатів.

Метою роботи є підвищення ефективності оцінювання динамічних параметрів АЦП за рахунок покращання роздільної здатності та статистичної стійкості оцінки результатів аналого-цифрового перетворення сигналів.

Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати аналіз динамічних параметрів АЦП;
- здійснити спектральне оцінювання сигналів на виході АЦП;
- проаналізувати ефективність спектрального методу оцінювання динамічних параметрів АЦП.

Аналіз динамічних параметрів АЦП

Динамічні параметри АЦП можна розподілити на три класи: параметри, що характеризують нелінійність перетворення, шуми перетворення й узагальнені параметри [2]. Гармонічні спотворення АЦП характеризують нелінійність перетворення синусоїдального сигналу $U_T(t) = U_m \cos(\omega t)$. Наявність інтегральної

нелінійності спричиняє виникнення у вихідному сигналі АЦП додаткових гармонік, кратних частоті вхідного сигналу. Значення амплітуд U_2, U_3, \dots, U_m гармонічних складових залежать від характеру інтегральної нелінійності АЦП. Коефіцієнт гармонічних спотворень АЦП дорівнює [2]

$$K_{HD} = 10 \lg \frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_m^2}{U_1^2}. \quad (1)$$

Узагальненим параметром АЦП є ефективне число розрядів, який для ідеального АЦП при наявності тільки шумів квантування та відсутності нелінійних спотворень знаходиться як [2]:

$$n_{ef} = \frac{S/N - 1,76}{6,02}. \quad (2)$$

де $\frac{S}{N}$ – відношення сигнал/шум.

Вищерозглянуті динамічні параметри АЦП базуються на застосуванні односигнальних методів оцінювання. Але більшість систем ЦОС функціонує з багаточастотними сигналами, тому значення динамічних параметрів АЦП при роботі зі спектрально насиченими сигналами за результатами вимірювань на одночастотних сигналах є некоректними [5]. З метою отримання адекватних умов функціонування апаратури ЦОС параметрів АЦП, пропонується використовувати двотональні тестові сигнали при оцінці динамічних параметрів перетворювачів [6, 7].

Для двотонального вхідного сигналу коефіцієнт інтермодуляційних спотворень АЦП визначається амплітудами складових комбінаційних частот $\omega_{mn} = \pm m\omega_1 \pm n\omega_2$, ($m, n = 1, 2, \dots$):

$$K_{IH} = 10 \lg \frac{U_{11}^2 + U_{12}^2 + \dots + U_{MN}^2}{U_1^2 + U_2^2}. \quad (3)$$

Коефіцієнти гармонічних спотворень для двочастотного вхідного сигналу та для окремо взятих основних складових тестового сигналу можна визначити за формулами:

$$K_{HD1} = 10 \lg \frac{U_{20}^2 + U_{30}^2 + \dots + U_{N0}^2}{U_1^2}, \quad (4)$$

$$K_{HD2} = 10 \lg \frac{U_{02}^2 + U_{03}^2 + \dots + U_{0M}^2}{U_2^2}. \quad (5)$$

Відношення сигнал/шум АЦП, яке характеризує сумарний рівень шумів перетворення для бігармонічного вхідного сигналу, можна обчислити з урахуванням вимог теореми Парсеваля:

$$\frac{S}{N} = 10 \lg \frac{U_1^2 + U_2^2}{\sum_{k=1}^N U_k^2}, \quad (6)$$

де U_k – значення амплітуд усіх частотних компонентів, окрім основних складових спектра сигналу

За результатами обчислення коефіцієнтів гармонічних й інтермодуляційних спотворень та відношення сигнал/шум вираз для ефективного числа розрядів АЦП буде мати вигляд:

$$n_{ef} = \left[1,66 \lg \frac{U_1^2 + U_2^2}{\sum_{k=1}^N U_k^2 + \sum_{n=2}^N U_{no}^2 + \sum_{m=2}^N U_{om}^2 + \sum_{l=1}^N U_l^2} \right] - 0,292, \quad (7)$$

де U_l – значення амплітуд інтермодуляційних складових.

Використовуючи процедуру вимірювання n_{ef} для кількох значень частоти вхідного сигналу, можна одержати залежність ефективного числа розрядів від частоти.

Спектральне оцінювання сигналів на виході АЦП

Останнім часом запропоновано декілька цифрових методів спектрального оцінювання сигналів на виході АЦП, які було розроблено для того, щоб послабити обмеження, властиві спектральному методу на базі дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). У роботі [1] наведено періодограмний метод оцінювання, згідно якого спектральну густину потужності (СГП) для вихідних відліків АЦП $x(n)$ та обсягу реалізації N , можна визначити так:

$$S(k) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \right|^2 = |X(k)|^2. \quad (8)$$

Періодограма є асимптотично незміщеною оцінкою СГП. Для великих масивів даних N її дисперсія наближається до квадрату істинної СГП [1]. Вибірковий спектр сигналу, обчислений за допомогою (1), буде давати статистично нестійкі оцінки СГП, оскільки у виразі відсутня операція математичного сподівання. Для отримання згладжених і статистично стійких оцінок СГП на кінцевому масиві відліків досліджуваного сигналу АЦП пропонується здійснювати згладжувальне оцінювання у часовому та частотному вимірі. Тому на першому етапі оброблення необхідно вхідний масив розділити на P сегментів по M відліків зі зсувом, що дорівнює B відліків між сусідніми сегментами.

Підпоследовності $x_p(n)$ довжиною по M відліків зсунені одна відносно одної на B відліків, при цьому p -й сегмент пов'язано зі вхідним масивом $x(n)$ співвідношенням:

$$x_p(n) = x[n + B \cdot (p - 1)], \quad (9)$$

де $p = 1, 2, \dots, P$.

Перед знаходженням періодограми кожен сегмент обробляється оптимальною віконною функцією. Зважений сегмент має такий вигляд:

$$x_{p\omega} = \omega_d(n) \cdot x[n + B(p - 1)], \quad (10)$$

де $\omega_d(n)$ – віконна функція даних.

Для кожної зі зважених підпоследовностей знаходяться коефіцієнти ДПФ за формулою:

$$X_p(k) = \frac{1}{U_d} \sum_{n=0}^{M-1} \omega_d(n) \cdot x_p(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi nk}{M}}, \quad (11)$$

де $U_d = \frac{1}{M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} \omega_d(n) \right|^2$ – енергія віконної функції.

Величина $I_p(k)$, що називається модифікованою періодограмою, знаходиться за виразом:

$$I_p(k) = \frac{1}{U_d} |X_p(k)|^2. \quad (12)$$

Середнє значення періодограм зважених сегментів дає оцінку СГП сигналу для заданого значення зсуву B :

$$S(k) = \frac{1}{P \cdot U_d} \sum_{p=1}^P \left| \sum_{n=0}^{M-1} \omega_d(n) \cdot x_p[n + B \cdot (p - 1)] \cdot e^{-j \frac{2\pi nk}{M}} \right|^2. \quad (13)$$

Завдяки перекриванню для заданого масиву даних можна сформулювати більшу кількість сегментів і тим самим зменшити значення дисперсії СГП. Для підвищення ефективності оцінювання параметрів АЦП пропонується застосувати корелограмне оброблення спектрів, що додатково підвищить статистичну стійкість отриманих результатів за рахунок усереднювального ефекту процесу автокореляції. Тому наступним етапом оброблення даних є виконання зворотного ДПФ для $S(k)$ з метою отримання симетричної оцінки автокореляції для $2M + 1$ часових зсувів

$$R(m) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} S(k) \cdot e^{j \frac{2\pi km}{M}}. \quad (14)$$

У подальшому оцінка $R(m)$ обробляється за допомогою симетричної кореляційної віконної функції $\omega_c(m)$ непарної довжини $2L + 1$. У результаті отримуємо зважену кореляційну оцінку

$$R_\omega(m) = R(m) \cdot \omega_c(m). \quad (15)$$

На останньому етапі виконується ДПФ для $R_\omega(m)$, що дає можливість отримати кінцевий вираз для оцінки СГП сигналу:

$$S_c(k) = \frac{1}{U_c} \sum_{m=0}^{M-1} R(m) \cdot \omega_c(m) \cdot e^{-j \frac{2\pi mk}{M}}. \quad (16)$$

Статистична стійкість оцінки $S_c(k)$ забезпечується усередненням по сегментам та частотним згладжуванням. Комбіноване часове та кореляційне зважування дозволяє керувати рівнем бічних паразитних пелюсток спектра.

Аналіз ефективності спектрального методу оцінювання динамічних параметрів АЦП

Для наочності аналізу ефективності запропонованого методу введемо коефіцієнт ефективності спектрального оцінювання Q_S , який показує, у скільки разів зменшується дисперсія оцінювання СГП вихідного сигналу АЦП згідно запропонованого методу порівняно з класичним спектральним методом. При обробленні перекривних підпоследовностей необхідно враховувати кореляцію зважених відліків сигналу в перетвореннях сусідніх ділянок підпоследовностей. Значення коефіцієнта кореляції $C(B)$ як функції степеня перекривання B можна визначити за формулою, наведеною у [8]. Перекривання сегментів менше 50% не використовується внаслідок малого числа оброблюваних підпоследовностей для таких режимів оброблення даних. Для 75%-го перекривання сегментів, тобто для значень зсуву $B = 0,25 \cdot M$ підвищується число оброблюваних підпоследовностей і коефіцієнт ефективності:

$$Q_{S,0,75} = \frac{P_{0,75}}{P_0 [1 + 1,5 \cdot C^2(0,75) + C^2(0,5) + 0,5 \cdot C^2(0,25)]}, \quad (17)$$

де $P_{0,75}$ – кількість перекривних сегментів для $B = 0,25 \cdot M$.

На рис. 1 наведено залежність коефіцієнта ефективності запропонованого методу оцінювання динамічних параметрів АЦП від числа неперервних сегментів даних для 50%-го та 75%-го перекривання підпоследовностей.

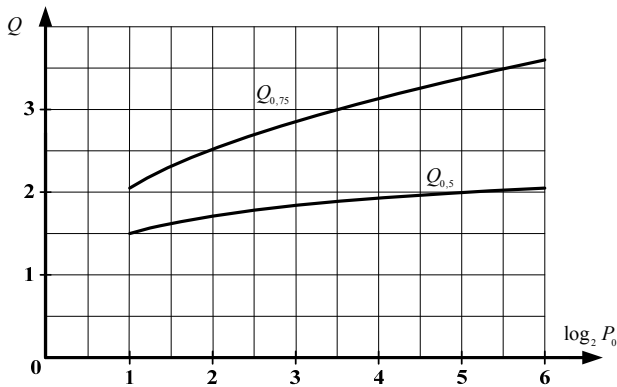


Рис. 1. Залежність коефіцієнта ефективності від числа сегментів
Роздільна здатність може бути

визначена як $\beta_f = \frac{\Delta f}{f_s}$, де

$\Delta f = \min|f_1 - f_2|$ – модуль мінімальної різниці частотних складових сигналу, при якій ще можливе роздільне оцінювання цих складових СГП сигналу. На рис. 2 наведено залежності роздільної здатності від вхідного масиву вибірок для класичного методу оцінювання (β_{f_0}) та запропонованого методу оцінювання з 50%-м перекриванням сегментів ($\beta_{f_{0,5}}$) і 75%-м перекриванням ($\beta_{f_{0,75}}$).

Найвищою роздільною здатністю характеризується запропонований метод з 75%-м перекриванням, причому для $P_0 = 32$ критерій $\beta_{f_{0,75}} = 0,002$, що у 3 рази перевищує показники класичного методу спектрального оцінювання.

Аналіз графіків засвідчує, що навіть для 50%-го перекривання дисперсія оцінювання СГП знижується в $1,5 \div 1,9$ разів залежно від числа оброблюваних сегментів. Мінімальна дисперсія досягається при 75%-му перекриванні, при якому коефіцієнт ефективності залежно від числа оброблюваних даних набуває значення від 2,1 до 3,6. Це можна пояснити тим, що таке перекривання вирівнює оброблення більшості відліків сигналу, оскільки ті відліки, що набували малу вагу в одному сегменті, отримували вищу значимість в інших оброблюваних сегментах.

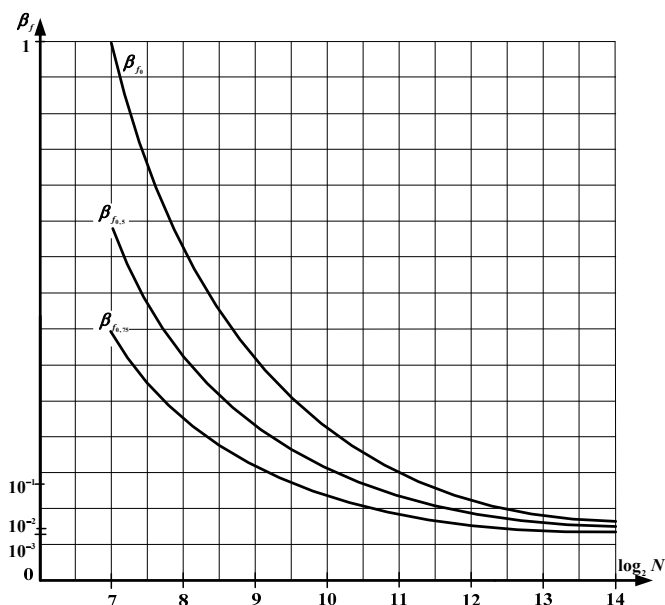


Рис. 2. Залежності роздільної здатності від обсягу масиву вихідних даних АЦП

Висновки

Запропоновано спектральний метод оцінювання динамічних параметрів АЦП, що базується на багатоетапному обробленні вибірок сигналу перетворювача.

Аналіз ефективності методу спектрального оцінювання дозволив стверджувати, що найкращою ефективністю характеризується запропонований метод зі 75%-м перекриванням оброблюваних сегментів, який порівняно з класичним методом дає змогу зменшити дисперсію оцінювання СГП у 2,1÷3,6 рази.

Аналіз роздільної здатності показав, що спектральне оцінювання згідно запропонованого методу здійснюється з частотним розрізненням, що у 3 рази вище, ніж для класичного методу. Реалізація спектрального оцінювання з використанням базових процедур ДПФ знижує обчислювальну складність запропонованого методу.

Література

1. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
2. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Бортник Г.Г. Автоматизированный измеритель параметров аналого-цифровых преобразователей / Г.Г. Бортник // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 1. – С.227-228.
7. Bortnik G. Correction of clock jitter in analog-digital equipment of telecommunication system / Bortnik, G., Vasylykivskiy, M., Cheloyan, V. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science - Proceedings of the 10th International Conference, TCSET'2010. – 2010. – P. 221.
8. Бортник Г.Г. Цифровий метод спектрального оцінювання випадкових сигналів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 2. – С.108-114.

References

1. Ayficher E.S. Cifrovay obrabotka signalov / E.S. Ayficher, B.W. Jervis. – М.: Williams, 2008. – 992 p.
2. Kester W. Analogo-cifrovoe preobrazovsnie / Walt Kester. – М.: Technosphere, 2007. – 1016 p.
3. Bortnyk G.G. Metodu ta zasobu analogo-cifrovogo peretvoreny vusokochastotnih signaliv / G.G. Bortnyk, S.G. Bortnyk, V.M. Kuchak. – Vinnytsya: VNTU, 2013. – 128 p. – ISBN 978-966-641-537-3.
4. Bortnyk G.G. Doslidzhennia intehralnoi neliniynosti analoho-tsyfrovoho peretvoriuvacha u bazysi dyskretnykh funksii Furie / G.G. Bortnyk, S.G. Bortnyk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2005. – № 5. – P. 117-119.
5. Bortnyk G.G. Analiz efektyvnosti analoho-tsyfrovoho peretvorennia syhnaliv u radiotekhnichnykh kompleksakh / G.G. Bortnyk, M.L. Minov, O.V. Stalchenko // Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. – 2011. – № 2. – P. 12-15.
6. Bortnik G. G. Avtomatyzyrovannyi izmeritel parametrov analoho-tsyfrovyykh preobrazovatelei / G.G. Bortnik // Pribory i Tekhnika Eksperimenta. – 1992. – №1. – P. 227-228.
7. Bortnik G. Correction of clock jitter in analog-digital equipment of telecommunication system / Bortnik, G., Vasylykivskiy, M., Cheloyan, V. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science - Proceedings of the 10th International Conference, TCSET'2010. – 2010. – P. 221.
8. Bortnyk G.G. Tsyfrovyy metod spektralnoho otsiniuvannya vypadkovykh syhnaliv / G.G. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, O.V. Stalchenko // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2014. – № 2. – P.108-114.

Рецензія/Peer review : 20.2.2016 р.

Надрукована/Printed : 25.3.2016 р.