

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 681.325

С. Г. Бортник, асп.; Н. О. Пунченко, асп.; О. В. Стальченко

## МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛІ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

*Запропоновано метод ідентифікації моделі аналого-цифрового перетворювача, що враховує інерційні та нелінійні ефекти аналого-цифрового перетворення. Отримано вираз для визначення ефективного числа розрядів АЦП та виконано аналіз залежності ефективної розрядності перетворювача від частоти вхідного сигналу.*

### Вступ

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є одними з найважливіших пристроїв сучасних та перспективних комп'ютерних систем, що суттєво впливають на їх граничні можливості, як за швидкістю, так і за динамічною точністю.

Складність аналізу процесів аналого-цифрового перетворення різних класів сигналів полягає в тому, що АЦП відносяться до нелінійних інерційних пристроїв і тому повна модель перетворювача повинна враховувати ці обидві властивості, що є надзвичайно складною задачею [1].

### Аналіз публікацій

Достатньо прості методи ідентифікації АЦП розглянуто в [2], де АЦП розглядається як безінерційний пристрій, що є коректним для сигналів з частотним діапазоном значно вужчим, ніж граничні смуги частот досліджуваних перетворювачів «аналог-код». При визначенні повних динамічних характеристик АЦП виникають складнощі, пов'язані з вибором класу моделей, які дають адекватний опис поведінки АЦП у динамічному режимі. При цьому слід зауважити, що проблема повного опису нелінійних динамічних об'єктів на сьогоднішній день не вирішена.

У роботі [3] наведено метод ідентифікації лінійної стохастичної моделі АЦП, який враховує інерційність процесу аналого-цифрового перетворення, але не дає можливості визначити узагальнені динамічні параметри у широкій смузі робочих частот.

### Мета та задачі дослідження

*Метою роботи є розробка методу ідентифікації моделі АЦП з урахуванням нелінійності характеристик перетворення та шумових ефектів, що виникають при аналого-цифровому перетворенні. Для досягнення поставленої задачі необхідно розв'язати такі задачі:*

- виконати вибір моделі АЦП;
- розробити спектральну методику визначення динамічної характеристики АЦП;
- здійснити аналіз ефективної розрядності АЦП та роздільної здатності у динамічному режимі.

### Розв'язання задач

При ідентифікації характеристик нелінійних динамічних систем широкого поширення набули каскадні моделі, що будуються на базі лінійних динамічних і нелінійних статичних елементів [4]. Такий клас моделей може бути ідентифікований з використанням функціональних рядів Вольтерра. Реалізація такого підходу є проблематичною, тому що вимагає визначення багатомірних ядер з використанням тестового сигналу типу «білий шум».

© С. Г. Бортник, Н. О. Пунченко, О. В. Стальченко, 2010

Для врахування динамічних властивостей АЦП пропонується модель (рис. 1), що містить аналоговий перетворювач (АП) (який може розглядатись як лінійне інерційне коло) та ідеальний безінерційний квантувач (КВ) з рівноступінчастою симетричною передатною характеристикою.

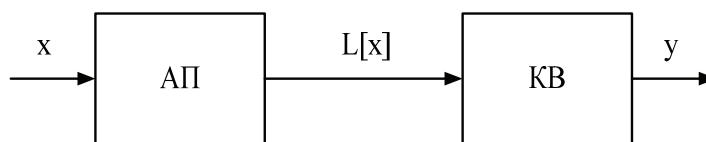


Рис. 1. Модель АЦП

Для опису інерційної частини використовується динамічні характеристики (імпульсна, перехідна, передатна), що є типовими для лінійних систем. А для відображення властивостей ідеального безінерційного квантувача використовується характеристика перетворення «сигнал-код».

Спектральні методи відносяться до найбільш поширених в експериментальних дослідженнях динамічних характеристик АЦП. Суть спектральних методів ґрунтується на порівнянні енергетичних спектрів вхідного тестового сигналу та вихідного цифрового сигналів. Теоретично, як випробувальний, при спектральному аналізі вихідних сигналів АЦП можна використовувати будь-який сигнал з відомою формою спектра. На практиці, внаслідок труднощів прецизійного формування та оцінювання спектрально складного сигналу використовується синусоїдальний сигнал.

Енергетичний спектр сигналу на виході АЦП дорівнює добутку квадрату модуля його коефіцієнта передачі —  $K(f_i)$  на вхідний енергетичний спектр —  $G_{\text{вх}}(f_i)$

$$G_{\text{вих}}(f_i) = |K(f_i)|^2 G_{\text{вх}}(f_i). \quad (1)$$

При мінімізації середнього квадрата відхилення модуля частотної характеристики АЦП від її реального вигляду, маємо

$$\sum_{i=1}^M \left[ |K(f_i)|^2 - \frac{G_{\text{вих}}(f_i)}{G_{\text{вх}}(f_i)} \right]^2 = \min. \quad (2)$$

де  $G_{\text{вих}}(f_i)$  — вихідний енергетичний спектр.

Застосуємо параметричне представлення характеристик  $K(f)_i$ . Тому модель частотної характеристики можна визначити за допомогою відповідних параметрів  $b_1, b_2, \dots, b_j$ . Передбачається, що на вхід АЦП подається синусоїдальний сигнал зі сканувальними частотами. Для визначення невідомих параметрів  $b_j$  необхідно виконати диференціювання (2) по  $b_j$ , при цьому отримуємо:

$$2 \sum_{i=1}^M \left[ |K(f_i)|^2 - \frac{G_{\text{вих}}(f_i)}{G_{\text{вх}}(f_i)} \right] \frac{\partial |K(f_i)|^2}{\partial b_j} = 0. \quad (3)$$

Представимо інерційні властивості АЦП колом першого порядку. При цьому єдиний невідомий параметр  $b_1$  на базі (3) буде дорівнювати

$$b_1 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^M \frac{f_i^2 G_{\text{вих}}(f_i)}{G_{\text{вх}}(f_i)} - \sum_{i=1}^M f_i^2}{\sum_{i=1}^M f_i^4} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

де  $f_i$  — частотні складові спектру.

На базі визначеної таким чином частотної характеристики можна знайти вихідний сигнал АЦП, що є результатом впливу блоку АП в моделі, показаної на рис. 1. Частотна характеристика не може бути повною динамічною характеристикою АЦП, тому що потрібно зважати ще на особливості проходження сигналу  $L[x]$  блоком КВ. Тому для враху-

вання нелінійності АЦП в його модель уведено додатковий шум. Для АЦП з кроком квантування  $h$  під час дослідження похибок аналого-цифрового перетворення широкого класу вхідних сигналів використовують рівномірно розподілений шум в інтервалі  $[-0,5h, 0,5h]$ . Потужність шумів квантування для рівномірної шкали перетворення дорівнює [2]

$$P_{\text{ш}} = \frac{h^2}{12}.$$

Цей вираз є справедливим при ідеальному квантуванні з рівномірним кроком (межі зміни вхідного сигналу узгоджено з характеристикою перетворення) згідно з законом з прямокутним розподілом імовірності похибки квантування в межах  $\pm 0,5$ .

Ефективне число розрядів є найузагальненішою характеристикою перетворення. Для ідеального АЦП за відсутності нелінійних спотворень та наявності лише шумів квантування у вищенаведених межах для синусоїдального вхідного сигналу ефективне число розрядів дорівнює [2]

$$n_{\text{еф.}} = \frac{S/N - 1,76}{6,02}, \quad (5)$$

де  $n_{\text{еф.}}$  — ефективне число розрядів;  $S/N$  — відношення сигнал/шум квантування.

Для широкого класу вхідних сигналів що характеризуються пік-фактором  $k$ , ефективне число розрядів буде визначатись як

$$n_{\text{еф.}} = \frac{S/N + 20 \lg k - 4,8}{6,02}. \quad (6)$$

Якщо відомо відношення сигнал/шум без впливу нелінійних спотворень, а коефіцієнт гармонік  $K_{\Gamma}$  визначено незалежно, то ефективне число розрядів можна визначити як

$$n_{\text{еф.}} = \frac{20 \lg \left[ 10^{\frac{S/N}{20}} - 10^{\frac{K_{\Gamma}}{20}} \right] + 20 \lg k - 4,8}{6,02}. \quad (7)$$

Інерційність АЦП та нелінійність їх характеристики перетворення зменшують ефективне число розрядів. Під час моделювання АЦП таке зменшення за рахунок інерційності враховується використанням частотної характеристики  $K(f)$ , а нелінійність перетворення імітувалась збільшенням кроку квантування. Для цього введемо в шумовий інтервал мультиплікативно два параметри, що будуть моделювати збільшення ширини кроку квантування

$$A = [-0,5\alpha\beta h; -0,5\alpha\beta h], \quad (8)$$

де  $\alpha$  — параметр, що враховує нелінійність аналого-цифрового перетворення;  $\beta$  — параметр, що враховує інерційні властивості АЦП.

Тоді ефективність числа розрядів АЦП з урахуванням (8) набуде вигляду

$$n_{\text{еф.}} = \frac{S/N + 20 \lg k - 20 \lg \alpha - 20 \lg \beta - 4,8}{6,02}. \quad (9)$$

Використавши процедуру визначення  $n_{\text{еф.}}$  для кількох значень частоти, можна отримати частотну залежність ефективного числа розрядів АЦП.

Визначимо різницю ефективної розрядності АЦП для ідеальної моделі аналого-цифрового перетворення та моделі з урахуванням інерційних і нелінійних властивостей для кожного значення частоти

$$\Delta n_{\text{еф.}}(f)_i = n_{\text{еф.}}(f)_i - n_{\text{еф.м}}(f)_i. \quad (10)$$

де  $\Delta n_{\text{еф.}}(f)_i$  — різниця ефективного числа розрядів;  $n_{\text{еф.м}}(f)_i$  — ефективне число розрядів моделі з урахуванням інерційних і нелінійних властивостей для кожного значення частоти.

За результатами експериментальних досліджень можна оцінити параметр інерційності

$\beta$  та врахувати його при моделюванні АЦП. Тоді для невідомого  $\alpha(f_i)$  на базі виразу (10) отримаємо

$$\alpha(f_i) = 10^{\frac{6,02\Delta n_{\text{эф.}}(f_i)}{20}}. \quad (11)$$

Аналіз цього виразу дозволяє стверджувати, що нелінійні ефекти при аналого-цифровому перетворенні представляються за допомогою дисперсії шуму, яка у свою чергу залежить від значення вхідного сигналу.

На базі запропонованого методу виконаємо дослідження ефективного числа розрядів швидкодіючого АЦП типу MAX1421 (рис. 2). Даний АЦП є 12-розрядним перетворювачем з максимальною частотою вхідного сигналу 50 МГц і ефективною розрядністю у робочій смузі частот, яка показана кривою 1 [5].

Крива 2 відображає лише вплив інерційних властивостей АЦП на ефективне число розрядів. А крива 3 враховує інерційні та шумові властивості АЦП згідно з запропонованим методом. Як видно з рис. 2, найкраща збіжність результатів моделювання та результатів експериментальних досліджень АЦП спостерігається у смузі низьких та середніх частот. Для даного типу АЦП спостерігається зниження роздільної здатності у смузі високих частот.

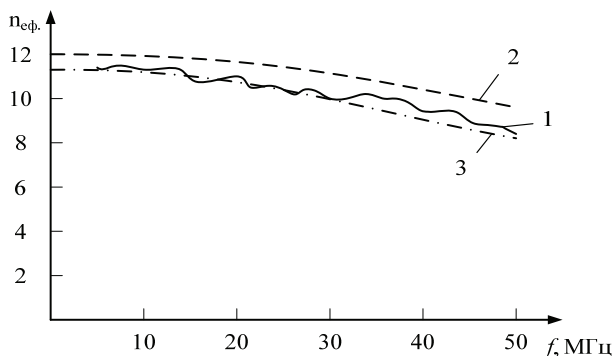


Рис. 2. Залежність ефективного числа розрядів АЦП від частоти вхідного сигналу

Рис. 2. Залежність ефективного числа розрядів АЦП від частоти вхідного сигналу

### Висновки

1. Запропоновано як модель АЦП використовувати послідовно ввімкнені лінійне інерційне коло та ідеальний безінерційний квантувач, що дає можливість врахувати нелінійність перетворювача та його динамічні властивості.

2. Для параметричного представлення характеристики АЦП отримано вираз для визначення невідомого параметра моделі, який дозволяє оцінити вплив блоку аналогового перетворення на частотну характеристику АЦП.

3. Запропоновано для врахування нелінійності АЦП в його модель вводити додатковий рівномірно розподілений шум, що підвищує достовірність оцінювання передатної характеристики АЦП.

4. Отримано вираз для визначення ефективного числа розрядів, що враховує інерційні та нелінійні властивості перетворювача. Цей вираз дає можливість підвищити адекватність аналізу динамічних характеристик АЦП.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Брагин А. Л. Основы метрологического обеспечения аналого-цифровых преобразователей электрических сигналов / А. А. Брагин, А. Л. Семенюк. — М. : Издательство стандартов, 1989. — 164 с.
2. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов / М. М. Гельман. — М. : Мир, 1999. — 559 с.
3. Загурский В. Я. Гетероскедастическая модель функционирования аналого-цифровых преобразователей в динамике / В. Я. Загурский, Семенова Н. Я., Гуляшко А. А. // Автоматика и вычислительная техника — 1992. — № 6. — С. 16—20.
4. Грановский В. А. Динамические измерения / В. А. Грановский. — Ленинград : Энергоатомиздат. — 1984. — 224 с.
5. Романов В. А. Быстродействующий 12-розрядный АЦП / В. А. Романов // Электронные компоненты и системы. — 2000. — № 1. — С. 48.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем і телебачення

Надійшла до редакції 2.07.09  
Рекомендована до друку 25.11.09

**Бортник Сергій Геннадійович** — аспірант, **Пунченко Наталія Олегівна** — аспірант, **Стальченко Олександр Володимирович** — асистент.

Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення, Вінницький національний технічний університет