

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, В. М. Кичак

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ
АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ
ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2013

УДК 681.325

ББК 32.965

Б21

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 8 від 28.03.2013 р.)

Рецензенти:

О. І. Рибін, доктор технічних наук, професор

О. М. Шинкарук, доктор технічних наук, професор

Бортник, Г. Г.

Б21 Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 128 с.

ISBN 978-966-641-537-3

У монографії розглянуто методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів, побудованих на базі мікросхем швидкодійних перетворювачів форми інформації. Для забезпечення високої роздільної здатності використовується процедура коригування, що базується на калібруванні аналого-цифрових перетворювачів. Запропоновано низку оригінальних рішень на рівні структур та алгоритмів функціонування.

Книга розрахована на науковців, аспірантів, студентів та фахівців, які займаються розробкою телекомунікаційних і радіотехнічних систем, а також систем цифрового оброблення високочастотних сигналів.

УДК 681.325

ББК 32.965

ISBN 978-966-641-537-3 © Г. Бортник, С. Бортник, В. Кичак, 2013

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ АЦП З КОРИГУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК.....	9
1.1 Динамічні похибки АЦП та похибки лінійності при перетворенні високочастотних сигналів	9
1.2 Складові динамічної похибки АЦП	16
1.3 Принципи підвищення роздільної здатності пристроїв аналого- цифрового перетворення високочастотних сигналів	20
РОЗДІЛ 2 МЕТОД КОРИГУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК У ФАЗОВІЙ ПЛОЩИНІ	31
2.1 Принципи коригування динамічних похибок АЦП у фазовій площині	31
2.2 Вибір та обґрунтування типу тестового сигналу.....	38
2.3 Особливості тестового сигналу АЦП у фазовій площині.....	40
2.4 Визначення динамічних похибок АЦП при його калібруванні	41
2.5 Спосіб синтезу бігармонічного сигналу АЦП	44
2.6 Визначення крутості вихідного сигналу аналого-цифрового перетворювача	45
2.7 Аналіз динамічних параметрів АЦП при фазо-площинному коригуванні результатів аналого-цифрового перетворення.....	47
2.8 Аналіз ефективності пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок.....	55
РОЗДІЛ 3 СТАТИСТИЧНИЙ МЕТОД КОРИГУВАННЯ ПОХИБОК ЛІНІЙНОСТІ АЦП ПРИ ПЕРЕТВОРЕННІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ.....	59
3.1 Принципи коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні високочастотних сигналів	59

3.2 Оцінювання похибки лінійності АЦП при перетворенні високочастотних сигналів на базі спотворення функції розподілу	62
3.3 Аналіз статистичних характеристик тестових сигналів АЦП.....	65
3.4 Аналіз граничної роздільної здатності АЦП при статистичному коригуванні	74
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ.....	
4.1 Інженерна методика побудови пристроїв аналого-цифрового перетворення.....	81
4.2 Пристрій аналого-цифрового перетворення з фазо-площинним коригуванням динамічних похибок	88
4.3 Пристрій аналого-цифрового перетворення зі статистичним коригуванням похибок лінійності при перетворенні високочастотних сигналів.....	92
4.4 Комп'ютерне моделювання розроблених пристроїв аналого- цифрового перетворення	94
4.4.1 Вибір та обґрунтування програмно-моделювального пакета.....	94
4.4.2 Комп'ютерне моделювання пристрою аналого-цифрового перетворення на базі фазо-площинного коригування динамічних похибок.....	95
4.5 Експериментальні випробування макетних зразків пристроїв аналого-цифрового перетворення	103
ЛІТЕРАТУРА	110

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	-	аналого-цифровий перетворювач
БЗП	-	буферний запам'ятовувальний пристрій
БК	-	блок керування
ВІС	-	велика інтегральна схема
ГТІ	-	генератор тактових імпульсів
ДПФ	-	дискретне перетворення Фур'є
ЕЗ	-	елемент затримки
ІВС	-	інформаційно-вимірвальна система
НПСЧ	-	надлишкові позиційні системи числення
ОЗП	-	оперативний запам'ятовувальний пристрій
ОМР	-	одиниця молодшого розряду
ПЗП	-	постійний запам'ятовувальний пристрій
ПК	-	персональний комп'ютер
ПЛМ	-	програмована логічна матриця
САЦП	-	самокоригувальний АЦП
ТКЗ	-	таблиця коригувальних значень
ТПС	-	таблиця простору станів
ХП	-	характеристика перетворення
ЦАП	-	цифро-аналоговий перетворювач
ЦОП	-	цифровий обчислювальний пристрій

ВСТУП

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) знаходять широке використання у галузі первинних і вторинних перетворень форми інформації. АЦП є обов'язковими компонентами комп'ютерних систем загального та спеціального призначення. Властивості та характеристики АЦП безпосередньо впливають на ефективність функціонування інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), орієнтовані на різні предметні області, а також комп'ютерних систем діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ, систем для вимірювання параметрів випадкових процесів і полів, засобів ідентифікації сигналів та пристроїв контролю технологічних процесів.

Проблема розробки теорії та проектування АЦП з високими точнісними характеристиками 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 з високою точністю перетворення неперервної форми представлення інформації у дискретну форму.

Традиційно проблема підвищення точності АЦП вирішувалася і частково вирішується як за рахунок застосування більш досконалої елементної бази, так і за рахунок уведення надлишковості на різних рівнях проектування систем і компонентів: інформаційному, структурно-схемотехнічному та функціонально-алгоритмічному. Пристрої аналого-цифрового перетворення з коригуванням похибок як новий напрямок техніки перетворення інформації сформувався у 70–80-х роках минулого століття. У його розвиток великий вклад внесли як вітчизняні так і зарубіжні вчені. У напрямку алгоритмічного та структурного аналізу та синтезу швидкодійних АЦП слід відмітити роботи наукових шкіл А. І. Кондалєва та В. О. Романова [1–6]. У розробку теорії та нових засобів високопродуктивних перетворювачів інформації на базі надлишкових систем числення значний вклад вніс О. Д. Азаров [7–15]. У теоретичні та експериментальні дослідження

мікроелектронних АЦП з табличним коригуванням похибок великий вклад внесли роботи В. Б. Смолова та У. Кестера. [16–24]. Великий вклад у побудову швидкодійних мікросхем АЦП з покращеними динамічними параметрами внесли Е.-А. К. Багданскіс та А.-Й. К. Марцинкявічус [25, 26]. Слід відзначити також дослідження В. В. Островерхова, які дозволили розкрити механізм виникнення динамічних похибок АЦП [27–30].

Незважаючи на низку вже вирішених питань, при застосуванні АЦП з коригуванням похибок існує ще багато проблем, які стримують широке використання АЦП в комп'ютерних системах. А саме: низька роздільна здатність у діапазоні високих частот вхідних сигналів (від 3 МГц і вище), недостатньо розроблені теоретичні аспекти та методи аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок, 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 сигналів, математичний опис яких у часовому і частотному вимірі є досить складним. Таким чином, сучасна схемотехніка не забезпечує реалізації потенційних можливостей швидкодійних АЦП, що обмежує ефективність використання сучасних комп'ютерних систем оброблення сигналів у радіолокації, цифровому зв'язку та телебаченні, авіакосмічних засобах цифрового оброблення сигналів. Далека до завершення й задача розроблення АЦП, які забезпечують високу роздільну здатність при перетворенні складних сигналів, що характеризуються широким спектром та є шумоподібними. Наслідком цього є невідповідність динамічних параметрів серійно випущених мікросхем АЦП заданим критеріям, що необхідні для виконання умов ефективного функціонування пристроїв аналого-цифрового перетворення у складі комп'ютерних систем.

На основі вищевикладеного актуальною задачею є розвиток теоретичних основ для розробки нових пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок, які дозволяють виконувати перетворення складних сигналів у широкій смузі частот і характеризуються високою роздільною здатністю та відповідністю похибок перетворення задекларованій роздільній здатності АЦП.

В першому розділі аналізуються похибки АЦП, що виникають при перетворенні високочастотних сигналів. Здійснено оцінювання скла-

дових динамічної похибки АЦП. Проведено аналіз принципів підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення сигналів. Здійснено постановку задачі підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів.

У другому розділі наведено метод коригування динамічних похибок пристроїв аналого-цифрового перетворення на базі коригування у фазовій площині. Здійснено аналіз принципів фазо-площинного коригування. Представлено вибір, обґрунтування, синтез та аналіз особливостей тестового сигналу у фазовій площині, що використовується для калібрування базового АЦП. Наведено спосіб визначення динамічних похибок АЦП при його калібруванні, що усуває вплив статичних похибок перетворювача. Здійснено визначення крутості вихідного сигналу АЦП на базі табличної методології. На основі аналізу складових динамічних похибок пристрою аналого-цифрового перетворення отримано вирази для ефективної розрядності АЦП та побудовано відповідні графіки, що підтверджують високу роздільну здатність запропонованого методу.

У третьому розділі здійснено аналіз принципів коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні високочастотних сигналів, виконано оцінювання похибки лінійності АЦП у динамічному режимі на базі спотворення функції розподілу, проведено обґрунтування та вибір типу тестового сигналу АЦП, виконано аналіз статистичних характеристик тестових сигналів АЦП, проаналізовано граничну роздільну здатність АЦП при статистичному коригуванні.

В четвертому розділі розглядається розробка інженерної методики побудови пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок. Здійснено розробку структурної схеми пристрою аналого-цифрового перетворення з фазо-площинним коригуванням динамічних похибок. Виконано розробку структурної електричної схеми пристрою аналого-цифрового перетворення з коригуванням похибок лінійності при перетворенні високочастотних сигналів. Проведено комп'ютерне моделювання запропонованих структур пристроїв. Наведено результати експериментального дослідження макетів пристроїв аналого-цифрового перетворення.

РОЗДІЛ 1

НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ АЦП З КОРИГУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК

У цьому розділі аналізуються основні похибки АЦП, що виникають при їх функціонуванні з високочастотними сигналами. Здійснено оцінювання складових динамічної похибки АЦП. Розглянуто принципи підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів.

1.1 Динамічні похибки АЦП та похибки лінійності при перетворенні високочастотних сигналів

Розглянемо модель квантувача. Опис похибок квантувача потребує специфічного підходу, що обумовлений відсутністю взаємно однозначної відповідності між входом та виходом АЦП (наявність похибки квантування).

Порівняння номінальної та реальної

$$N \cdot q = x + \varepsilon_q(x), \quad (1.1)$$

характеристик перетворення (ХП) АЦП (квантувача) показує, що може мати місце загальний зсув рівнів компарування по відношенню до початку координат, випадковий розкид інтервалів між рівнями та зміна середнього кроку компарування (рис. 1.1).

Функція методичної похибки ідеального квантувача ($x_{N_m} = (N - 0,5) \cdot q$) має вигляд

$$\varepsilon_{q_m}(x) = N \cdot q - x; x_{N_m} \leq x < x_{N+1_m}; N = \overline{0, M}, \quad (1.2)$$

а функція повної похибки реального квантувача має вигляд

$$\varepsilon_q(x) = N \cdot q - x; x_N \leq x < x_{N+1}; N = \overline{0, M}, \quad (1.3)$$

якій, окрім методичної похибки властива також інструментальна похибка [31].

Однак $\varepsilon_q(x)$ не є алгебраїчною сумою методичної та інструментальної похибок. Тому визначати математично інструментальну похибку через різницю $\varepsilon_q(x) - \varepsilon_{q_m}(x)$ було б невірно, тому що $\varepsilon_{q_m}(x)$ та $\varepsilon_q(x)$ відносяться до одного виду похибки – похибки квантування.

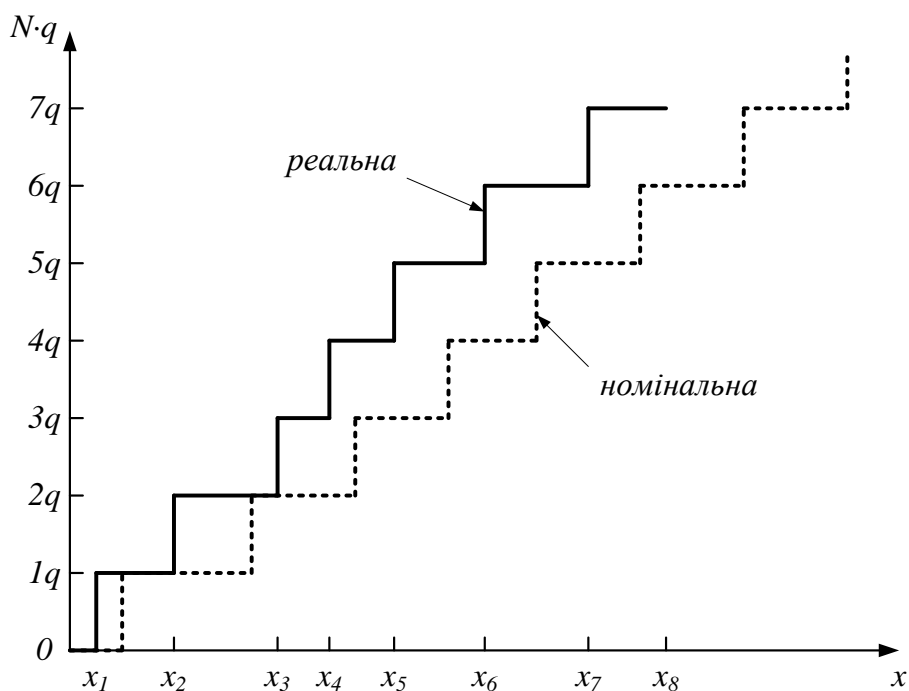


Рисунок 1.1 – Номінальна та реальна функції перетворення АЦП

Інструментальною похибкою слід вважати приріст похибки квантування при зміщенні рівнів компарування відносно заданого (номінального) положення [32, 33]:

$$\Delta_s[N] = \varepsilon_q(x_N) - \varepsilon_{q_m}(x_{N_m}), \quad (1.4)$$

або

$$\Delta_s[N] = \varepsilon_q(x_N) - 0,5q. \quad (1.5)$$

Отже, з $\varepsilon_q(x)$ можна виділити адитивну (Δ_0) та мультиплікативну ($\delta_k x$) складові інструментальної похибки. Інша частина похибки – це сукупність методичної та інструментальної похибки, тобто [34]

$$\varepsilon_q(x) = \Delta_0 + \delta_k x + \varepsilon_{q_p}(x). \quad (1.6)$$

Відповідно до (1.5)

$$\Delta_s[N] = \Delta_0 + \delta_k x_N + \varepsilon_{q_p}(x) - 0,5q. \quad (1.7)$$

Останні два члени правої частини цього виразу можуть розглядатися як похибка лінійності [35]:

$$\Delta_n[N] = \varepsilon_{q_p}(x_N) - 0,5q. \quad (1.8)$$

Тоді остаточно маємо

$$\Delta_s[N] = \Delta_0 + \delta_k x_N + \Delta_n[N]. \quad (1.9)$$

Похибку Δ_s будемо називати систематичною складовою інструментальною похибкою або просто систематичною похибкою, на відміну від випадкової похибки, що породжується флуктуаціями параметрів елементів АЦП. З (1.8) та (1.9) видно, що інструментальна похибка АЦП є дискретною функцією.

Часто бажано знати приріст похибки лінійності (1.8) на кроці квантування

$$\Delta'_n[N] = \Delta_n[N+1] - \Delta_n[N], \quad (1.10)$$

який називають диференціальною нелінійністю. Отже, характеристику перетворення (1.1) з урахуванням виконаного розкладання функції похибки $\varepsilon_q(x)$ на складові можна записати у вигляді [36]

$$N \cdot q = x + [\Delta_0 + \delta_k x + \varepsilon_{q_p}(x)]. \quad (1.11)$$

Позначивши

$$x^* = \Delta_0 + (1 + \delta_k) \cdot x, \quad (1.12)$$

запишемо (1.11) таким чином:

$$N \cdot q = x^* + \varepsilon_{q_p} \left(\frac{x^* - \Delta_0}{1 + \delta_k} \right). \quad (1.13)$$

Функцію похибки $\varepsilon_{q_p}(x)$ можна визначити заново, якщо приписати рівням квантування нові значення згідно з (1.12): $x_N^* = \Delta_0 + (1 + \delta_k) \cdot x_N$; $N = \overline{1, M}$.

Тоді

$$N \cdot q = x^* + \varepsilon_q^*(x^*). \quad (1.14)$$

Похибка лінійності (1.8) зберігає своє значення при переході від $\varepsilon_{q_p}(x)$ до $\varepsilon_q^*(x^*)$: $\Delta_n[N] = \varepsilon_q^*(x_N^*) - 0,5q$. Вирази (1.12) та (1.14) дають підставу представити математичну модель квантувача ($X_q(t) \leftarrow x(t)$) у вигляді двох рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} X_q(t) &= x^*(t) + \varepsilon_q^*[x^*(t)]; \\ x^*(t) &= \Delta_0 + (1 + \delta_k) \cdot x(t). \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Відповідне графічне зображення моделі показано на рис. 1.2 [37].

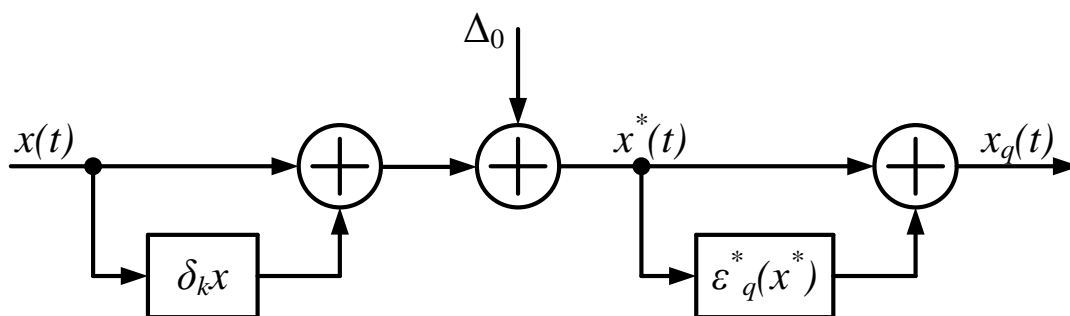


Рисунок 1.2 – Модель квантувача

Розкладання функції повної похибки $\varepsilon_q(x)$ на складові Δ_0 , $\delta_k \cdot x$ та $\varepsilon_{q_p}(x)$ не є однозначною. Задача стає визначеною при накладанні додаткових умов, наприклад, мінімуму середньоквадратичного значення похибки лінійності [31]:

$$\sum_{N=1}^M (\Delta_n[N])^2 = \min_{\Delta_0, \delta_k} \sum_{N=1}^M \{ \Delta_s[N] - (\Delta_0 + \delta_k \cdot x_N) \}^2, \quad (1.16)$$

або мінімуму її абсолютного значення

$$\Delta_n^* = \min_{\Delta_0, \delta_k} \max_N \{ \Delta_s[N] - (\Delta_0 + \delta_k \cdot x_N) \}. \quad (1.17)$$

АЦП є складним об'єктом при розв'язанні задач нормування та експериментального визначення метрологічних властивостей. Аналізуючи модель АЦП, видно, що одні її параметри та функціональні елементи: Δ_0 , δ_k , $x_{noise}(t)$, $\varepsilon_q(x^*(t), dx^*/dt)$ впливають на похибку перетворення як при постійному вхідному сигналі, так і при змінному вхідному сигналі, а інші – $g(t-t')$; τ_{di} – тільки при вхідному сигналі, що змінюється. Останні називаються динамічними, а на протипагу їм перші з деякою умовністю можна назвати статичними [36].

При дослідженні динамічних властивостей АЦП висновки про них виносять на основі аналізу динамічних спотворень (похибок вимірювання) випробувального сигналу, що спостерігаються. У відповідності з моделлю АЦП динамічна похибка – завжди результат сумісного впливу обмеженої смуги пропускання ($g(t-t')$) і випадкової затримки відліку (t_d). Розглянемо виникнення динамічної похибки через похибку датування відліків і можливість експериментального визначення останньої [38–39].

Нехай швидкість змінювання вхідного сигналу під час перетворення постійна та дорівнює $\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=t_i}$. Очевидно, що при затримці моменту взяття відліку на τ_{di} має місце динамічна похибка

$$\Delta_{di} = \left(\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=t_i} \right) \cdot \tau_{di}. \quad (1.18)$$

Основні причини збільшення диференціальної та інтегральної нелінійності паралельних АЦП у динаміці – сильна залежність часу перемикавання реальних компараторів від швидкості зміни вхідного сигналу та перезбудження компараторів. Причиною появи пропускання кодів, викидів та аномальних похибок є збої у роботі кодувальної логіки, що відбуваються через розриви унітарного коду в результаті неспрацьовування окремих компараторів. Нарешті, причиною зменшення коефіцієнта передачі паралельних АЦП є відзначена вище закономірність, пов'язана з кінцевим часом перемикавання компараторів, а також частотні обмеження вхідних каскадів [40–43].

Однак незалежно від причин появи тих чи інших відхилень характеристик перетворення паралельних АЦП від статичних постає питання, як оцінювати якість їх роботи у динаміці. Як відомо, існує два підходи до оцінки похибок квантування реальних АЦП. Один з них використовує критерій максимальної похибки та композицію окремих складових похибки, що приводить до нормальної апроксимації закону їх розподілення. Такий підхід ефективний при використанні АЦП у різних інформаційно-вимірювальних системах. Другий підхід базується на використанні критерію середньоквадратичної похибки та пов'язаного з нею поняття динамічного діапазону АЦП [44]. Цей підхід ефективний при функціонуванні АЦП з випадковими сигналами та використовується у сучасних комп'ютерних системах [36].

Динамічний діапазон ідеального n -розрядного АЦП (в децибелах) визначається співвідношенням

$$D = \frac{U_{\max}}{U_{nms}} = 20 \lg \left[\sqrt{12} \cdot (2^n - 1) \right], \quad (1.19)$$

де U_{\max} – максимальне значення вхідного сигналу; U_{nms} – середньоквадратичне значення шуму квантування.

З урахуванням того, що кожен розряд АЦП дає динамічний діапазон 6,02 дБ, останнє співвідношення для динамічного діапазону ідеального АЦП дорівнює [45]

$$D = 6,02 \cdot (n + 1,76). \quad (1.20)$$

Інколи для оцінки динамічного діапазону АЦП використовують співвідношення [19]

$$D' = 20 \lg \frac{U_{ms}}{U_{nms}}, \quad (1.21)$$

де U_{ms} – середньоквадратичне значення сигналу.

Для синусоїдального сигналу цей вираз перетворюється у

$$D' \approx 6n + 1,8. \quad (1.22)$$

Для реальних АЦП динамічний діапазон за потужністю

$$D_r = 10 \lg \frac{P_s}{P_{nh} + P_{add}}, \quad (1.23)$$

де P_s – потужність сигналу; P_{nh} – потужність шумів квантування; P_{add} – потужність додаткового шуму квантування, що викликаний відхиленням реальної характеристики від ідеальної.

Оскільки уся інформація про метрологічні характеристики будь-якого АЦП закладена у його реальній характеристиці перетворення, то, використовуючи характеристики перетворення у статиці та динаміці, можна з єдиних позицій оцінити роздільну здатність паралельних АЦП як у статичному, так і у динамічному режимах. Це важливий висновок, який дозволяє користуватися добре розробленою методологією оцінки статичної похибки реальних АЦП для оцінки якості їх роботи у динаміці.

Принципова відмінність статичного та динамічного режимів роботи АЦП полягає у тому, що у динаміці додатковий шум квантування більший, ніж у статиці. Крім того, коефіцієнт передачі АЦП залежить від частоти вхідного сигналу. Додатковий шум квантування вимірюють у дисперсіях шуму квантування ідеального АЦП, тобто $P_{add} = l \cdot P_{nh}$, що дозволяє записати для динамічного діапазону реального АЦП

$$D_r = \frac{12 \cdot (2^n - 1)^2}{l^2 + 1}. \quad (1.24)$$

На рис. 1.3 наведено графік, що показує втрати у динамічному діапазоні реального АЦП відносно ідеального АЦП ($l = 0$) залежно від параметра l [46].

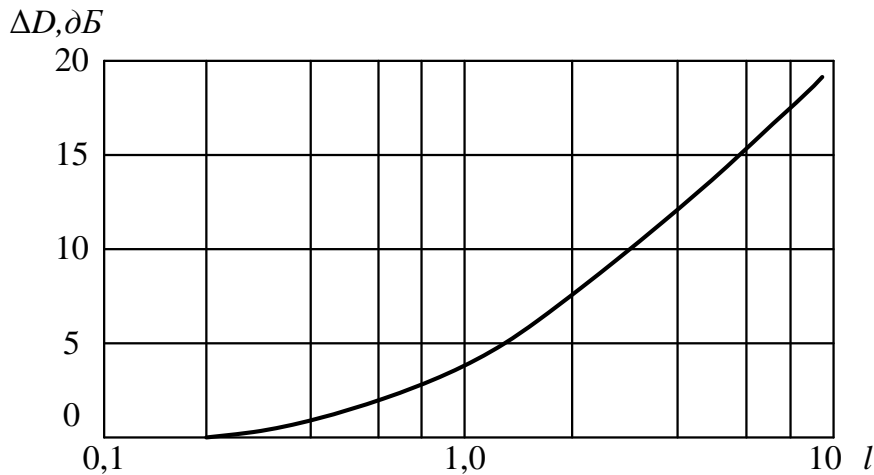


Рисунок 1.3 – Графік втрат АЦП у динаміці залежно від параметра $l = P_{add} / P_{nh}$

Для оцінювання якості роботи АЦП у динаміці за допомогою цього графіка необхідно знати потужність додаткових шумів квантування, що виникають на заданій частоті вхідного сигналу або у заданому діапазоні частот.

Як впливає з розглянутих вище локальних методів контролю динамічних характеристик АЦП, усі вони зводяться до вимірювання середньоквадратичного значення результуючих шумів квантування та порівняння його з шумом квантування ідеального АЦП з таким же числом розрядів. Далі за цим показником можна оцінити динамічний діапазон реального АЦП для конкретних умов роботи та відповідне йому число двійкових розрядів, які завжди менші номінального значення, що відноситься до ідеального перетворювача. Це число є ефективною кількістю розрядів АЦП і представляє собою ту єдину числову характеристику, яка визначає роздільну здатність АЦП у заданому динамічному діапазоні.

Загальний вираз для ефективної кількості розрядів АЦП при відомих середньоквадратичних значеннях шумів квантування має вигляд [46]

$$n_{ef} = n_{id} - \log_2 \frac{P_{rh}}{P_{idh}}, \quad (1.25)$$

де n_{id} – число розрядів ідеального АЦП; P_{rh} – шум квантування реального АЦП; P_{idh} – шум квантування ідеального АЦП.

Вираз у знаменнику, виміряний у кроках квантування, дорівнює $1/\sqrt{12}$. Визначити ефективну кількість розрядів можна або за допомо-

гою наведеного виразу, або шляхом визначення динамічного діапазону реального АЦП D_r і відповідного перерахунку за формулою [47]

$$n_{ef} = \frac{D_r - 1,76}{6,02}, \quad (1.26)$$

де D_r виражено у дБ.

Виходячи із загальних виразів, усі розглянуті вище локальні методи та засоби контролю, що дозволяють прямо або непрямо визначити результуючі шуми квантування досліджуваного АЦП або його динамічний діапазон, можна використовувати для оцінювання ефективного числа розрядів контрольованих АЦП.

Застосовуючи процедуру вимірювання для декількох значень частоти вхідного сигналу, можна отримати залежність ефективної кількості розрядів від частоти [45].

1.2 Складові динамічної похибки АЦП

Під динамічною похибкою АЦП при змінних у часі параметрах сигналу або АЦП розуміється різниця $\Delta_d(t)$ між зафіксованим приладом значенням вимірної величини $U_x(t) \sim n$ та її істинним значенням $U_i(t)$ у розглядуваний момент часу t без урахування статичних похибок та похибки дискретності, тобто [30]

$$\Delta_d(t) = U_x(t) - U_i(t). \quad (1.27)$$

Розрізняють два види динамічних похибок АЦП [30]:

– динамічну похибку першого роду Δ_{I_d} , що обумовлена інерційністю окремих вузлів АЦП і визначається величиною та тривалістю перехідних процесів у цих вузлах;

– динамічну похибку другого роду Δ_{II_d} , що обумовлена зміною вхідного сигналу за час перетворення і визначається швидкістю зміни або частотним спектром кодованого сигналу.

Динамічна похибка Δ_{II_d} визначається лише внутрішніми процесами аналого-цифрового перетворення при незмінній у часі вимірюваній величині U_x . Однак у багатьох випадках застосування АЦП вхідний сигнал U_x змінюється у часі. При цьому, оскільки час перетворення T_c АЦП вхідної величини $U_x(t)$ кінцевий, виникає динамічна похибка Δ_{II_d} [30], яка оцінюється швидкістю зміни вхідного сигналу

$U'_x = \frac{dU_x(t)}{dt}$ за час одного перетворення і визначається виразом

$$\Delta_{II d} \leq U'_x \cdot T_c. \quad (1.28)$$

Значення $\Delta_{II d}$ АЦП залежить також від використовуваного методу аналого-цифрового перетворення та від вибору моменту відліку результату перетворення [27]. Зазвичай момент відліку відносять до моменту проведення останньої операції порівняння на n -му такті, тобто $t_{ccl} = t$.

Інколи АЦП нормуються похибкою, приведеною до межі перетворення, або максимальною похибкою $\delta_{ADC \max} = \Delta_{ADC \max} / U_c$, або середнім по шкалі квадратом похибки $\overline{\delta_{ADC}^2} = \overline{\Delta_{ADC}^2} / U_c^2$ [48–49].

Оцінювання похибки АЦП максимальним значенням використовується тоді, коли необхідно знання кожного перетворення із заданою точністю. Частіше це потрібно при перетворенні за допомогою АЦП низькочастотних сигналів в одноканальних або багатоканальних ІВС.

Оцінювання похибки АЦП середнім квадратом використовується тоді, коли необхідно знати помилку, що вноситься АЦП при сумісних вимірюваннях у багатоканальних ІВС, або помилку перетворення широкосмугових вхідних сигналів. Відповідним чином будемо оцінювати і динамічну похибку як одну із складових похибки АЦП. У загальному випадку загальну похибку АЦП можна представити як суму трьох складових [31]:

$$\delta_{ADC \max} = \delta_{st \max} + \delta_{d \max} + \delta_{h \max} \quad (1.29)$$

або

$$\overline{\delta_{ADC}^2} = \overline{\delta_{st}^2} + \overline{\delta_d^2} + \overline{\delta_h^2}, \quad (1.30)$$

де $\delta_{st \max} = \Delta_{st \max} / U_c$ та $\overline{\delta_{st}^2} = \overline{\Delta_{st}^2} / U_c^2$ – максимальне значення та середній квадрат статичної похибки АЦП, що обумовлена часовою та температурною нестабільністю, власними шумами та неточністю окремих елементів основних вузлів перетворювача;

$\delta_{d \max} = \Delta_{d \max} / U_c$ та $\overline{\delta_d^2} = \overline{\Delta_d^2} / U_c^2$ – максимальне значення та середній квадрат динамічної похибки АЦП;

$\delta_{h \max} = h/2$ та $\overline{\delta_h^2} = h^2/12$ – максимальне значення та середній квадрат похибки дискретності АЦП.

Основний вплив на вибір параметрів, що характеризують динаміку аналого-цифрового перетворення, здійснюють динамічні похибки та похибки дискретності, що обумовлює взаємозв'язок характеристик АЦП та кодованого сигналу. Статична складова похибки АЦП, загалом, також впливає на вибір цих параметрів, тому що існує певний

взаємозв'язок між статичними та динамічними характеристиками елементів АЦП. Так, більш швидкодійні елементи, як правило, характеризуються нижчою точністю. Однак при порівняльному аналізі різних АЦП з ідентичними характеристиками елементів цей зв'язок буде незначним.

Розглянемо взаємозв'язок характеристик АЦП та кодованого сигналу. Як зазначено у [30], динамічні похибки є не стільки характеристиками конкретного АЦП, скільки характеристиками процесу аналого-цифрового перетворення, результат якого визначається як параметрами АЦП, так і параметрами кодованого сигналу. Значення динамічних похибок Δ_{Id} та $\Delta_{II d}$, час перетворення, число розрядів АЦП, швидкість зміни або діапазон частот, закон розподілення та параметри вхідного кодованого сигналу виявляються взаємопов'язаними.

Як показано у [27], динамічна похибка від перехідних процесів Δ_{Id} визначає швидкодію АЦП. Тривалість перехідних процесів при заданій їх величині визначає час t_{cc} елементарних операцій аналого-цифрового перетворення – час перемикаць зразкових мір та їх порівняння з вхідним сигналом на кожному такті перетворення. При заданому числі тактів перетворення $l = n$, час перетворення АЦП порозрядного зрівноваження визначається виразом

$$T_c = \sum_{i=1}^n t_{cci}. \quad (1.31)$$

З формули (1.30) видно, що динамічна похибка $\Delta_{II d}$ залежить від швидкості зміни (першої похідної) кодованого сигналу, яка певним чином характеризує вхідний сигнал. На практиці вхідні сигнали, особливо широкосмугові, характеризуються не швидкістю зміни, а певною граничною частотою, що є характеристикою ширини частотного спектра сигналу, який кодується. У цьому випадку для оцінювання максимального значення динамічної похибки АЦП на заданій граничній частоті або, навпаки, для оцінювання граничної частоти за заданим значенням динамічної похибки користуються нерівністю Бернштейна [35]

$$U'_{x \max}(t) \leq \omega_{co} |U_{x \max}(t)|, \quad (1.32)$$

де $\omega_{co} = 2\pi \cdot f_{co}$ – частота зрізання спектра вхідного сигналу, що має максимальне значення $U_{x \max}$ та максимальну першу похідну $U'_{x \max}$.

Так, використовуючи нерівності (1.30) та (1.34) при заданому значенні динамічної похибки, інколи наводять оцінку частотного спектра сигналів, кодованих АЦП [30]. Слід відмітити, що оцінка, яка отриму-

ється при цьому, є наближеною, тому що не враховує статистичних характеристик сигналу: закону розподілення $W(U_x)$, дисперсії σ_x^2 , математичного сподівання M_x , кореляційної функції $r(\tau)$ та ін.

Більш точну оцінку можна дати за допомогою значення середнього квадрата динамічної похибки, яка у загальному вигляді є функцією усіх параметрів АЦП і характеристик кодованого сигналу, тобто

$$\bar{\Delta}_{II d}^2 = \varphi[T_c, \omega_c, W(U_x), \sigma_x^2, M_x, r(\tau)]. \quad (1.33)$$

Параметри АЦП: число розрядів та частота дискретизації впливають на значення $\bar{\Delta}_{II d}^2$, як і на значення $\Delta_{II d \max}^2$.

Таким чином, для визначення середнього квадрата динамічної похибки необхідно знати статистичні характеристики кодованого сигналу та передусім закон розподілення значень вхідного сигналу за шкалою АЦП.

Найчастіше кодовані сигнали мають нормальне розподілення, рівномірне або розподілення за арксинусом. Ці розподілення використовуються при аналізі залежностей динамічних похибок. Відоме [19] логарифмічно-рівномірне розподілення кодованого сигналу по шкалі пристрою зустрічається значно рідше і справедливе при діапазоні вхідних сигналів, що перекриває декілька порядків, що в АЦП не завжди має місце.

Розглянемо загальні методи зменшення динамічних похибок АЦП.

Аналіз динамічних похибок АЦП та дослідження їх основних характеристик являється першим кроком у техніці аналого-цифрового перетворення. Необхідна також розробка методів їх зменшення, оскільки це забезпечує можливість збільшення роздільної здатності, підвищення ефективності АЦП та розширення частотного спектру вхідних кодованих сигналів.

Динамічні похибки перетворення можуть бути зменшені:

- схемними методами;
- використанням комбінованих методів аналого-цифрового перетворення;
- методом контролю та корекції процесу аналого-цифрового перетворення.

Схемні методи зазвичай застосовуються для зменшення динамічних похибок першого роду [50, 51] шляхом використання в окремих аналогових вузлах АЦП пасивних коригувальних ланок [52] або різних способів захисту від перевантажень, що викликають тривалі перехідні процеси [53]. Ці методи достатньо добре відомі та широко застосовуються на практиці.

Застосування знаходять і комбіновані методи аналого-цифрового перетворення. Суть їх полягає у тому, що перетворення змінного вхідного сигналу виконується у два етапи, двома різними способами. На першому виконується грубе перетворення, а на другому – більш точне, з урахуванням зміни сигналу за час грубого перетворення. Зазвичай використовуються комбінації методів порозрядного та стежного зрівноваження, або методу порозрядного зрівноваження та методу зчитування, або методу стежного зрівноваження та методу зчитування [19].

Загальний недолік цих методів зменшення динамічної похибки полягає в значному ускладненні структури АЦП, в обмеженні за допустимим значенням динамічної похибки, тому що діапазон точного перетворення значно вужчий загального діапазону.

Більш ефективними і тому найбільш перспективними є методи контролю та коригування процесу аналого-цифрового перетворення. Цим методам в останній час приділяється все більше уваги. Їхня суть полягає у тому, що у певні моменти часу виконується контроль процесу перетворення та у випадку виникнення динамічної похибки здійснюється коригування перетворення у сторону зменшення цієї похибки.

В роботах [54–56] розглядається синтез та досліджуються оптимальні алгоритми функціонування АЦП, що коригують динамічну похибку, яка обумовлена зміною вимірної величини. У цих роботах побудована математична модель АЦП, що працює в умовах дії одного з чотирьох видів збурення, які характеризують зміщення шуканої точки x по відрізьку $(0, 1)$. Знайдені оптимальні (i, k, s) -алгоритми, що коригують ці зміщення із заданою точністю за мінімальну кількість кроків. Слід відмітити, що знайдені оптимальні алгоритми забезпечують досягнення гранично можливого ступеня коригування динамічних похибок. Це дозволяє порівнювати з ними усі інші алгоритми з коригуванням та оцінювати їх ефективність. До недоліків отриманих алгоритмів слід віднести велику складність реалізації запропонованих схем, незручність та велику складність представлення результатів перетворення зі змінною основою числення.

Таким чином, існують способи зменшення динамічних похибок АЦП, і, в першу чергу, метод автоматизованого контролю та коригування, дослідження та розвиток якого будуть розглянуті в окремому розділі монографії.

1.3 Принципи підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів

Роздільна здатність АЦП і цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) визначається значеннями похибок перетворення, що є складовою частиною метрологічних характеристик. Нормування метрологіч-

ЛІТЕРАТУРА

1. Кондалев А. И. Преобразователи формы информации компьютерного типа / А. И. Кондалев. – К., 1990. – 46 с. – (Препр. / АН України; 90–91).
2. Кондалев А. И. Системные преобразователи формы информации / А. И. Кондалев. – К. : Наукова думка, 1974. – 336 с.
3. Вопросы проектирования преобразователей формы информации / А. И. Кондалев, А. Н. Никитин, В. А. Багацкий [и др.] ; под. общей ред. А. И. Кондалева. – К. : Наукова думка, 1977. – 242 с.
4. Преобразователи формы информации для малых ЭВМ / Кондалев А. И., Багацкий В. А., Романов В. А., Фабричев В. А. – К. : Наукова думка, 1982. – 312 с.
5. Высокопроизводительные преобразователи формы информации / А. И. Кондалев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, В. А. Фабричев. – К. : Наукова думка, 1987. – 280 с.
6. Преобразователи формы информации с обработкой данных / В. А. Багацкий, Ю. М. Грешищев, И. В. Самус, В. А. Фабричев ; под. ред. А. И. Кондалева. – К. : Наукова думка, 1992. – 264 с.
7. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю : монографія / О. Д. Азаров. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 232 с.
8. Азаров О. Д. Конверсні аналого-цифрові перетворювачі з ваговою надлишковістю : монографія / О. Д. Азаров, О. В. Шапошніков, С. М. Захарченко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 157 с.
9. Параметры и схемотехника высокопроизводительных АЦП и ЦАП / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. П. Марценюк, В. И. Моисеев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1984. – № 2. – С. 79–91.
10. Азаров О. Д. Аналого-цифрові інтерфейси ЕОМ : навч. посіб. / О. Д. Азаров, В. П. Марценюк, Н. О. Білченко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 178 с.
11. Крупельницький Л. В. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія / Л. В. Крупельницький, О. Д. Азаров; під. заг. ред. О. Д. Азарова. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005 – 167 с.
12. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення : монографія / О. Д. Азаров. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004 – 260 с.
13. Азаров О. Д. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів : монографія / О. Д. Азаров, О. А. Архипчук, С. М. Захарченко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 125 с.

14. Аналого-цифровые преобразователи на основе избыточных систем счисления / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев [и др.] // Помехоустойчивые коды. – М. : Знание. – 1989. – С. 40–48.

15. Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления: учеб. пособие / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. П. Марценюк [и др.] ; под общей ред. А. П. Стахова. – К. : УМК ВО, 1988. – 180 с.

16. Смоллов В. Б. Микроэлектронные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации / В. Б. Смоллов, Е. П. Угрюмов, В. К. Шмидт ; под. ред. В. Б. Смоллова. – Л. : Энергия, 1976. – 336 с.

17. Грушвицкий Р. И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, В. Б. Смоллов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 160 с.

18. Информационные системы : табличная обработка информации / Е. П. Балашов, В. Н. Негода, Д. В. Пузанков [и др.] ; под ред. Е. П. Балашова и В. Б. Смоллова. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1985. – 184 с.

19. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование : пер. с англ. / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с.

20. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов : пер. с англ. / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2010. – 328 с.

21. Кестер У. Входной шум АЦП: всегда ли нужно с ним бороться? / У. Кестер // Электронные компоненты и системы. – 2006. – № 5. – С. 3–8.

22. Кестер У. Как правильно выбрать АЦП? / У. Кестер // Электронные компоненты и системы. – 2005. – № 12. – С. 12–18.

23. Kester W. DSP Test techniques keep ADC's in check / W. Kester // EDN. – 1990. – № 2. – P. 133–136, 138, 140, 142.

24. Kester W. Flash ADC's provide the basis for high-speed conversion / W. Kester // EDN. – 1990. – № 1. – P. 101–106, 108, 110.

25. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров / А.-Й. К. Марцинкявичюс, Э.-А. К. Багданскис, Р. Л. Пошюнас [и др.] ; под ред. А.-Й. К. Марцинкявичюса, Э.-А. К. Багданскиса. – М. : Радио и связь, 1988. – 224 с.

26. Микросхемы памяти, ЦАП и АЦП : справочник / О. Н. Лебедев, А.-Й. К. Марцинкявичюс, Э.-А. К. Багданскис [и др.]. – 2-е изд., стереотип. – М. : КУБК-а, 1996. – 384 с.

27. Островерхов В. В. Динамические характеристики АЦП и методы их определения / В. В. Островерхов, В. В. Павлов, А. А. Фремке // Измерительная техника. – 1979. – № 4. – С. 22–25.

28. Островерхов В. В. Определение динамических погрешностей АЦП адаптивным методом / В. В. Островерхов, В. В. Павлов // Проблемы создания преобразователей формы информации: материалы IX Всесоюз. симп. – К. : Наукова думка, 1980, ч.2. – С. 57–61.
29. Островерхов В. В. Автоматизация определения динамической погрешности аналого-цифровых преобразователей / В. В. Островерхов, В. В. Павлов // Методы и средства аналого-цифрового преобразования параметров электрических сигналов и цепей : тез. докл. II Всесоюзной конференции. – Пенза : ЦНТИ, 1981. – С. 133–135.
30. Островерхов В. В. Динамические погрешности аналого-цифровых преобразователей / В. В. Островерхов. – Л. : Энергия, 1975. – 176 с.
31. Гитис Э. И. Аналого-цифровые преобразователи : учеб. пособие для вузов / Э. И. Гитис, Е. А. Пискулов. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 360 с.
32. Орнатский Е. П. Автоматические измерения и приборы / Е. П. Орнатский. – К. : Вища школа, 1980. – 560 с.
33. Орнатский Е. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / Е. П. Орнатский. – К. : Вища школа, 1983. – 455 с.
34. Орнатский Е. П. Автоматические измерения и приборы / Е. П. Орнатский. – 5-е изд. перераб. и доп. – К. : Вища школа, 1986. – 504 с.
35. Швецкий Б. И. Электронные цифровые приборы / Б. И. Швецкий. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Техника, 1991. – 191 с.
36. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов / М. М. Гельман. – М. : Мир, 1999. – 559 с. –
37. Бахтиаров Г. Д. Аналого-цифровые преобразователи / Г. Д. Бахтиаров, В. В. Малинин, В. П. Школин ; под ред. Г. Д. Бахтиарова – М. : Советское радио, 1980. – 280 с.
38. Брагин А. А. Основы метрологического обеспечения аналого-цифровых преобразователей электрических сигналов / А. А. Брагин, А. Л. Семенюк. – М. : Издательство стандартов, 1989. – 164 с.
39. Грановский В. А. Динамические измерения : основы метрологического обеспечения / В. А. Грановский. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1984. – 224 с.
40. Шилаев С. Особенности применения высокочастотных АЦП / С. Шилаев, О. Фомин // Электроника : НТБ. – 2008. – № 1. – С. 84–87.
41. Мерзликин С. Сверхбыстродействующие АЦП : особенности архитектуры / С. Мерзликин // Электроника : НТБ. – 2008. – № 1. – С. 30–33.

42. Хабаров Ю. А. Структурные методы построения устройств АЦП сверхбыстродействующего класса / Ю. А. Хабаров // Приборы и средства автоматизации. – 1993. – № 4. – С. 22–26.
43. Романов В. А. Параметры АЦП общего применения и быстродействующих АЦП / В. А. Романов // Электронные компоненты и системы. – 2001. – № 8. – С. 24,25.
44. Моисеев В. С. Системное проектирование преобразователей информации / Моисеев В. С. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982. – 255 с.
45. Динамические параметры аналого-цифровых преобразователей и методы их измерений / П. И. Руднев, Б. А. Хаджи, В. Ю. Чернышев, С. Н. Шилов // Радиотехника и электроника. – 1993. – № 10. – С. 1868–1876.
46. Аминев А. М. Методы и средства контроля динамических параметров быстродействующих АЦП / А. М. Аминев, Г. Д. Бахтиаров, А. Л. Тимофеев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 4. – С. 36–55.
47. Бортник Г. Г. Методи та засоби контролю динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, О. А. Семенюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1997. – № 2. – С. 19–28.
48. Прикладные математические методы анализа в радиотехнике : учеб. пособие для радиотехнич. спец. вузов / Ю. А. Евсеев, Г. В. Обрезков, В. Д. Разевиг [и др.] ; под ред. Г. В. Обрезкова. – М. : Высш. шк., 1985. – 343 с.
49. Алексеев В. А. Прогнозирование точности аналого-цифровых преобразователей на ранних этапах проектирования / В. А. Алексеев, О. В. Михарева // Радиотехника. – 2008. – № 155. – С. 330–334.
50. Imran A. A 50-MS/s (35 mW) to 1-kS/s (15 μ W) Power Scaleable 10-bit Pipelined ADC Using Rapid Power-On Opamps and Minimal Bias Current Variation / Imran Ahmed, David A. Johns // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – Vol. 40, No. 12. – P. 2446–2455.
51. Balestrieri E. A state of the art on ADC error compensation methods / E. Balestrieri, P. Daponte, S. Rapuano // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – August 2005. – P. 1388–1394.
52. Dent A. C. Linearization of analog-to-digital converters / A. C. Dent, C. F. N. Cowan // IEEE Transactions on Circuits and Systems, June 1990. – P. 729–737.
53. Никамин В. А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: справочник / В. А. Никамин. – СПб. : КОРОНА принт; М. : Альтекс-А, 2003. – 224 с.

54. Reeder R. Pushing the state of the Art with Multichannel A/D Converters / R. Reeder, M. Looney, J. Hand // *Analog Dialogue*. – 2005. – № 5. – P. 3–6.
55. McNeill J. «Split ADC» Architecture for Deterministic digital background Calibration of a 16-bit 1-MS/s ADC / John McNeill, Michael C. W. Coln, Brian J. Larivee // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2005. – Vol. 40, No. 12. – P. 2437–2445.
56. Bergman D. I. Dynamic error correction of a digitizer for time domain metrology // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, October 2004. – P. 1384–1390.
57. Федорков Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б. Г. Федорков, В. А. Телец. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
58. Волович Г. И. Микросхемы АЦП и ЦАП : справочник / Г. И. Волович, В. Б. Ежов ; отв. ред. Т. Е. Брод. – М. : Додэка-XXI, 2005. – 432 с.
59. Lundin H. On external calibration of analog-to-digital converters. / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // *IEEE Workshop on Statistical Signal Processing : proceedings of the conference, Singapore*. – August 2001. – P. 377–380.
60. Lundin H. ADC post-correction using limited resolution correction values / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // *IMEKO 10th Workshop on ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference, Gdynia/Jurata, Poland, September 2005*. – Vol. 2. – P. 567–572.
61. Using an interpolation method for noise shaping in A/D converters / P. Daponte, R. Holcer, L. Horniak [et al.] // *7th European Workshop on ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference, Prague, Czech Republic, June 2002*. – P. 147–150.
62. Giaquinto N. Detection, digital correction and global effect of A/D converters nonlinearities / N. Giaquinto, M. Savino, A. Trotta ; in P. Daponte and L. Michaeli , editors // *International Workshop on ADC Modelling, Slovak Republic, May 1996*. – P. 122–127.
63. Браннон Б. Апертурная неопределенность и рабочие характеристики АЦП / Брэд Браннон, Ален Барлогу // *Электроника : НТБ*. – 2006. – № 4. – С. 26–29.
64. Дорофеев П. Современные быстродействующие АЦП с большим динамическим диапазоном / П. Дорофеев, П. Руднев // *Электроника : НТБ*. – 2006. – № 4. – С. 23–25.
65. Козак В. Прецизионные аналого-цифровые преобразователи / В. Козак // *Электроника : НТБ*. – 2006. – № 4. – С. 35–37.

66. Yu-Wei Lin A 1-GS/s FFT/IFFT Processor for UWB applications / Yu-Wei Lin, Hsuan-Yu Liu, Chen-Yi Lee // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – Vol.40, No. 8. – P. 1726–1734.

67. A 106-dB SNR Hybrid Oversampling analog-to-Digital Converter for Digital Audio / Khiem Nguyen, Robert Adams, Karl Sweetland, Huaijin Chen // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – Vol. 40, No. 12. – P. 2408–2415.

68. Shabra A. Oversampled Pipeline A/D Converters With Mismatch Shaping / Ayman Shabra, Hae-Seung Lee // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2002. – Vol. 37, No. 5. – P. 566–577.

69. Слюсар В. Суперскоростные АЦП и ЦАП. Новые игроки на рынке / В. Слюсар // Электроника : НТБ. – 2003. – № 6. – С. 18–20.

70. Ридер Р. Особенности проектирования многоканальных АЦП / Р. Ридер, М. Лунней, Дж. Хенд // Электронные компоненты и системы. – 2006. – № 6. – С. 3–6.

71. Lundin H. A criterion for optimizing bit-reduced post-correction of AD converters / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – August 2004. – P. 1159–1166.

72. Lundin H. A framework for external dynamic compensation of AD converters / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // 7th European Workshop on ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference, Prague, Czech Republic. – June 2002. – P. 135–138.

73. Lundin H. Analog-to-digital converter error correction using frequency selective tables / H. Lundin, T. Andersson, M. Skoglund, P. Handel // Radio Vetenskap och Kommunikation (RVK) : proceedings of the conference, Stockholm, Sweden. – June 2002. – P. 487–490.

74. De Vito L. Bayesian calibration of a look-up table used for ADC error correction / L. De Vito, H. Lundin, S. Rapuano // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference : proceedings of the conference, Ottawa, Canada. – May 2005. – Vol.1. – P. 293–297.

75. Hummels D. Performance improvement of all-digital wide-bandwidth receivers by linearization of ADCs and DACs / D. Hummels // Measurement. – January 2002. – P. 35–45.

76. Бортник Г. Г. Цифровий кодер телевізійних сигналів на базі диференціальної імпульсно-кової модуляції / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, В. А. Челоян // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 2. – С. 35–40. – ISSN 1681-7893.

77. Tsimbinos J. Improved error-table compensation of A/D converters / J. Tsimbinos, K. V. Lever // IEE Proceedings – Circuits, Devices and Systems. – December 1997. – P. 343–349.

78. Walden R. H. Analog-to digital converter servey and analysis // IEEE Journal on Selected Areas in Communication. – April 1999. – P. 539–550.

79. Бортник Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням похибок на основі фазо-площинної матриці / Г. Бортник, С. Бортник, О. Стальченко // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2006) : матеріали другої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 16–19 лист. 2006 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 53–54.

80. Бортник Г. Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням похибок на основі фазо-площинної матриці / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007. – № 2. – С. 14–21.

81. Волощук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці : підручник для студентів вищих навчальних закладів ; в 2 т. Т. 2 / Волощук Ю. І. – Харків : Компанія СМІТ, 2003. – 444 с.

82. Загурский В. Я. Метод исследования нелинейности аналого-цифровых преобразователей в динамике / В. Я. Загурский, Н. Я. Семенова // Измерительная техника. – 1989. – № 9. – С. 3–4.

83. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – изд. 3-е. – М. : Высшая школа, 2000. – 462 с.

84. Бортник Г. Г. Дискретизація вузькосмугових сигналів / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 2. – С. 45–48.

85. Кичак В. М. Дослідження тестових сигналів для контролю характеристик аналого-цифрових перетворювачів / В. М. Кичак, С. Г. Бортник, Н. О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 1. – С. 80–84.

86. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003. – 604 с.

87. Бортник Г. Г. Аналого-цифровий перетворювач на базі диференціальної імпульсно-кової модуляції / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, В. А. Челоян // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2006. – № 2. – С. 57–61.

88. Петровский А. А. Методы и микропроцессорные средства обработки широкополосных и быстропротекающих процессов в реальном времени / А. А. Петровский ; под ред. Г. В. Римского. – Минск : Наука и техника. – 1988. – 272 с.

89. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход: пер. с англ. / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис. – 2-е издание. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.

90. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие для вузов / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – 2-изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1990. – 256 с.

91. Кичак В. М. Динамічна модель аналого-цифрового перетворювача / В. М. Кичак, С. Г. Бортник., Н. О. Пунченко // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації : тези доповідей другої Міжнар. науково-практичної конф., Вінниця, 22–24 квітня 2009 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – С. 180–181.

92. Лайонс Ричард. Цифровая обработка сигналов : пер. с англ. / Ричард Лайонс. – 2-е издание. – М. : Бинوم-Пресс, 2006. – 656 с.

93. Теория передачи сигналов / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, М. В. Назаров, Л. М. Финк.– М. : Радио и связь, 1986. – 304 с.

94. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.

95. Проектирование специализированных информационно-вычислительных систем : учеб. пособие по спец. ЭВМ и АСУ / Ю. М. Смирнов, Г. Н. Воробьев, Е. С. Потапов, В. В. Сюзев ; под ред. Ю. М. Смирнова. – М. : Высш. шк., 1984. – 359 с.

96. Бортник Г. Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням диференціальної нелінійності на основі гістограмного методу оцінювання параметрів / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, В. А. Челоян // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – Т. 2, № 2. – С. 140–142.

97. Бортник Г. Г. Дослідження інтегральної нелінійності аналого-цифрового перетворювача за допомогою дискретного перетворення Фур'є / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2005) : матеріали першої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 2–5 червня 2005 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – С. 45–46.

98. Кичак В. М. Аналого-цифрове перетворення сигналів з надмірною дискретизацією / В. М. Кичак, С. Г. Бортник // Приладобудування-2004 : збірник праць міжнародної науково-технічної конф., м. Ялта, 2004 р. – Вінниця-Ялта, 2004. – С. 96–100.

99. Загурский В. Я. Использование статистического метода контроля аналого-цифровых преобразователей для расчета динамических погрешностей в спектральной области / В. Я. Загурский, Н. Я. Семенова // Автомат. и вычисл. техн. – 1992. – № 6. – С. 38–44.

100. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 656 с.

101. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – 4-е изд. – М. : Физматлит, 1963. – 1100 с.

102. Бортник С. Г. Статистичний метод коригування нелінійності аналого-цифрових перетворювачів у динамічному режимі / С. Г. Бортник, В. М. Кичак, Н. О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 2. – С. 90–93.

103. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2009. – 384 с.

104. Кичак В. М. Оптимізація систем з цифровим обробленням сигналів / В. М. Кичак, С. Г. Бортник, Н. О. Пунченко // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010) : тези доповідей десятої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 19–21 жовтня 2010 р. – Вінниця, 2010. – С. 155.

105. Lundin H. On the estimation of quantizer reconstruction levels / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference : proceedings of the conference, Ottawa, Canada, May 2005. – Vol. 1. – P. 144–149.

106. Carbone P. Performance of stochastic and deterministic dithered quantizers / P. Carbone, D. Petri // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, April 2000. – P. 337–340.

107. Carbone P. Statistical efficiency of the ADC sinewave histogram test / P. Carbone, E. Nunzi, D. Petri // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – 2002. – P. 849–852.

108. Бортник Г. Г. Аналого-цифровий перетворювач на базі табличного методу коригування диференціальної нелінійності / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, С. Г. Бортник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 5. – С. 124–128.

109. Бортник Г. Табличний метод коригування похибок аналого-цифрових перетворювачів / Г. Бортник, С. Бортник, В. Кичак // Сучасні проблеми, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007) : матеріали третьої Міжнар. науково-технічної конф., м. Вінниця, 31 травня–2 червня 2007 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – С. 84–85.

110. Бортник Г. Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням нелінійності у базисі Уолша / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, В. М. Кичак // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації : тези доповідей першої Міжнар. науково-практичної конф., Вінниця, 15–17 травня 2007 р. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – С. 119–120.

111. Бортник Г. Г. Методи та засоби обробки високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 132 с.

112. 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. 117–120.

113. Мячев А. А. Интерфейсы средств вычислительной техники : справочник / А. А. Мячев. – М. : Радио и связь, 1993. – 352 с.

114. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия / М. Гук. – СПб. : Питер, 2003. – 528 с.

115. Бортник С. Г. Метод ідентифікації моделі аналого-цифрового перетворювача / С. Г. Бортник, Н. О. Пунченко, О. В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 1. – С. 88–91.

116. Кичак В. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням динамічних похибок / В. Кичак, С. Бортник // Сучасні проблеми, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009) : матеріали IV Міжнар. науково-технічної конф., м. Вінниця, 8–10 жовтня 2009 р., Частина 1. – Вінниця, 2009. – С. 45.

117. Пат. на корисну модель 35500 Україна, МПК Н03М 1/12. Пристрій для аналого-цифрового перетворення / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200804101 ; заявл. 01.04.2008 ; опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18. – 6 с.

118. Бортник С. Швидкодійний аналого-цифровий перетворювач з покращеними динамічними параметрами / С. Бортник // Сучасні проблеми, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011) : матеріали V Міжнар. науково-технічної конф., м. Вінниця, 19–21 травня 2011 р. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 9–10.

119. Пат. на корисну модель 12879 Україна, МПК Н03М 1/36. Аналого-цифровий перетворювач / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200505418 ; заявл. 06.06.2005 ; опубл. 15.03.2006, Бюл. № 3. – 10 с.

120. Бортник Г. Цифровий панорамний аналізатор спектра / Г. Бортник, С. Бортник, В. Костецький // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2006) : матеріали другої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 16–19 лист. 2006 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 55–56.

121. Пат. на корисну модель 11757 Україна, МПК Н03М 1/12. Паралельний аналого-цифровий перетворювач / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200505399 ; заявл. 06.06.2005 ; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. – 8 с.

122. Looney M. Advanced Digital Post-Processing Techniques Enhance Performance in Time-Interleaved ADC Systems / Mark Looney // Analog Dialogue. 2003. – No. 8. – P. 36–40.

123. Современный подход к моделированию АЦП в телекоммуникационных устройствах / К. Эдельман, Б. Брэннон, С. Даунинг, Т. МакЛеод // Электроника : НТБ. – 2007. – № 2. – С. 112–114.

124. Giaquinto N. Testing and optimizing ADC performance: A probabilistic approach / N. Giaquinto, M. Savino, A. Trotta // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, April 1996. – P. 621–626.

125. Salkintzis A. K. ADC and DSP challenges in the development of software radio base stations / A. K. Salkintzis, H. Nie, P. T. Mathiopoulos // IEEE Personal Communications Magazine, August 1999. – P. 47–55.

126. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 / М. А. Амелина, С. А. Амелин – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 466 с.

127. The VSM Advantage [Электронный ресурс]. – Режим доступа до публікації : http://www.labcenter.com/products/vsm_overview.cfm

128. Хернитер М. Е. Multisim. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств / М. Е. Хернитер – М. : Пресс, 2006. – 492 с.

129. Бортник Г. Аналого-цифровий перетворювач телевізійних сигналів на основі диференціальної імпульсно-кової модуляції / Г. Бортник, С. Бортник, В. Челоян // Сучасні проблеми, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007) : матеріали третьої Міжнар. науково-технічної конф., м. Вінниця, 31 травня–2 червня 2007 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – С. 86–87.

130. Бортник Г. Г. Спектральний метод ідентифікації моделі аналого-цифрового перетворювача / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник // Контроль і управління в технічних системах (КУСС-2005) : тези доповідей VIII Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 24–27 жовтня 2005 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – С. 121.

131. Kichak V. The mathematical model of the analog-digital converter / V. Kichak, G. Bortnik, S. Bortnik // Modern problems of radio engineerings, telecommunications and computer science (TCSET'2006) : proceedings of the Int. Conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 28–March 4, 2006. – Lviv : Publishing House of Lviv Polytechnic, 2006. – P. 564–565.

132. Бортник Г. Г. Оптимізація методу спектрального оцінювання сигналів на коротких інтервалах часу / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко // XIII Міжнар. конф. з автоматичного управління (Автоматика-2006) : тези доповідей тринадцятої Міжнар. науково-

технічної конф., м. Вінниця, 25–28 вересня 2006 р. – Вінниця : УНІ-ВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 27.

133. Kychak V. High-efficient method of determination of a dynamic characteristic of the analog-to-digital converter / V. Kychak, S. Bortnyk, N. Puchenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2010) : proceedings of the Xth Int. Conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 27–27, 2010. – Lviv : Publishing House of Lviv Polytechnic, 2010. – P. 65.

134. Kychak V. Processing of signals by wavelet and Fourier transformations / V. Kychak, O. Stalchenko, S. Bortnyk // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2008) : proceedings of the Int. Conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 19–23, 2008. – Lviv : Publishing House of Lviv Polytechnic, 2008. – P. 479–480.

135. Schoukens J. Design of broadband excitation signals with a user imposed power spectrum and amplitude distribution / J. Schoukens, T. Dobrowiecki // Instrumentation and Measurement Technology Conference. IMTC/98 : proceedings of the conference, St. Paul, USA, May 1998. – Vol. 2. – P. 1002–1005.

136. Gao X. M. Modeling the harmonic distortion of analog-to-digital converter using Volterra series / X. M. Gao, S. Sun // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference : proceedings of the conference, IMTC/1994, May 1994. – Vol. 2. – P. 911–913.

137. Загурский В. Я. Исследование нелинейности аналого-цифровых устройств / В. Я. Загурский, Н. Я. Семенова // Методы и средства преобразования информации. – 1989. – № 9. – С. 80–93.

138. Moschitta A. Statistical performance of Gaussian ADC histogram test / A. Moschitta, P. Carbone, D. Petri // 8th International Workshop on ADC Modeling and Testing : proceedings of the conference, Perugia, Italy, September 2003. – P. 213–217.

139. Analog to Digital Converters. – Режим доступу до публікації : <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-onverters/products/index.html>

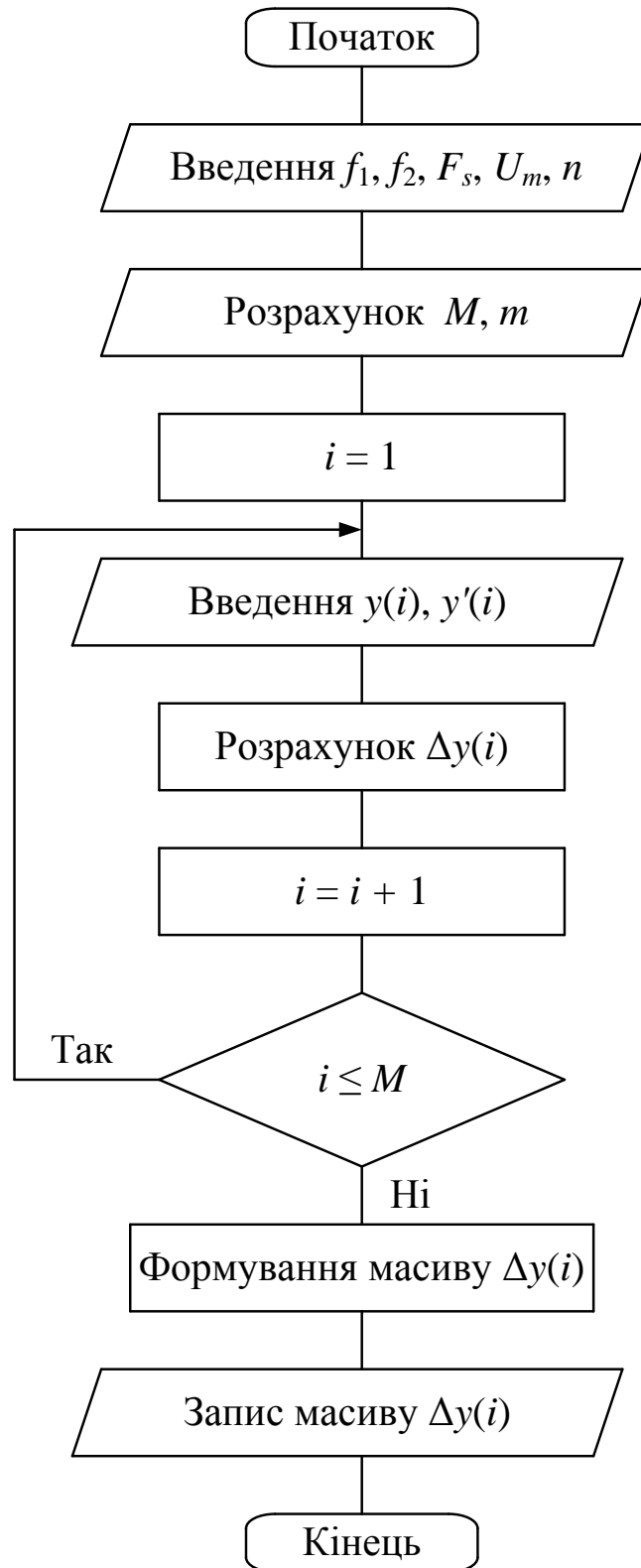
140. Кичак В. М. Методи реалізації швидкодіючих засобів цифрової обробки сигналів / В. М. Кичак, Г. Г. Бортник, В. В. Ролінський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 4. – С. 87–91.

141. Стешенко В. Б. ПЛИС фирмы Altera : элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры / В. Б. Стешенко. – 3-е изд. – М. : Додэка-XXI, 2007. – 576 с.

142. Перебаскин А. В. Отечественные микросхемы / А. В. Перебаскин. – М. : Додэка-XXI, 2004. – 400 с.

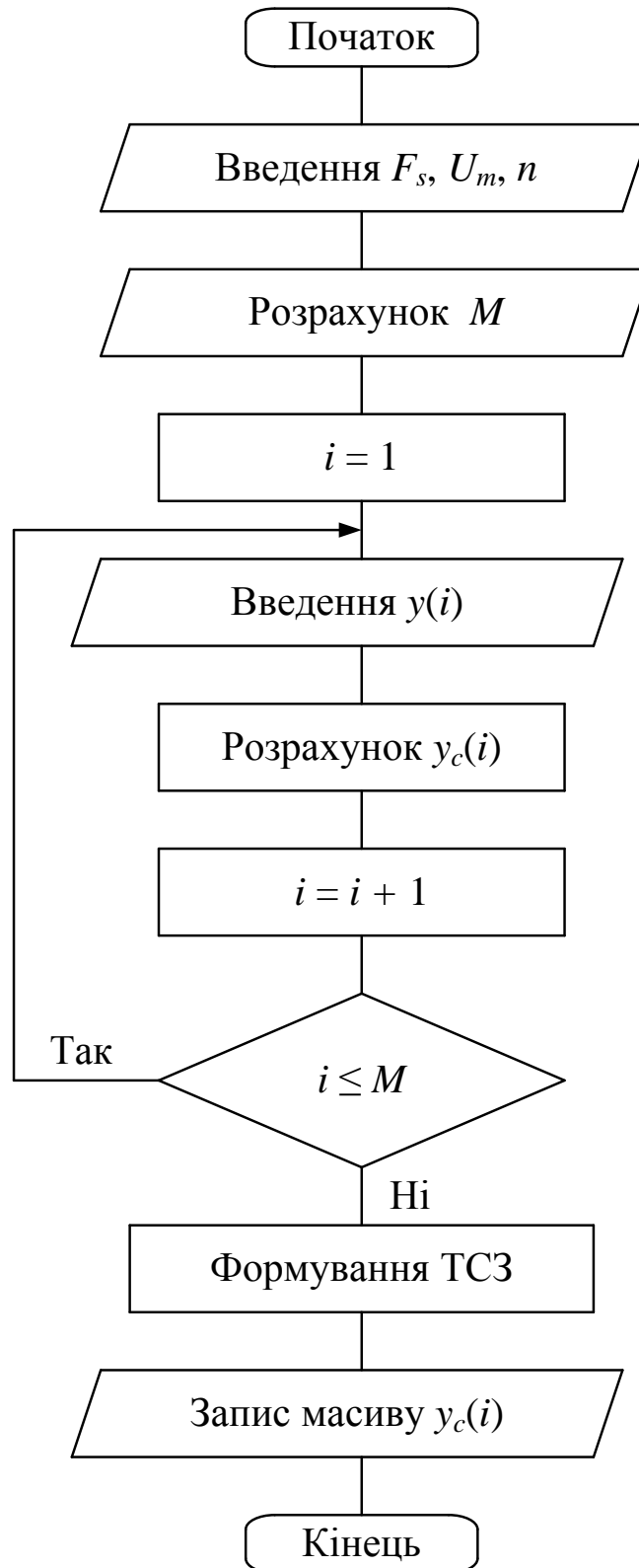
Додаток А

Блок-схема алгоритму фазо-площинного калібрування АЦП



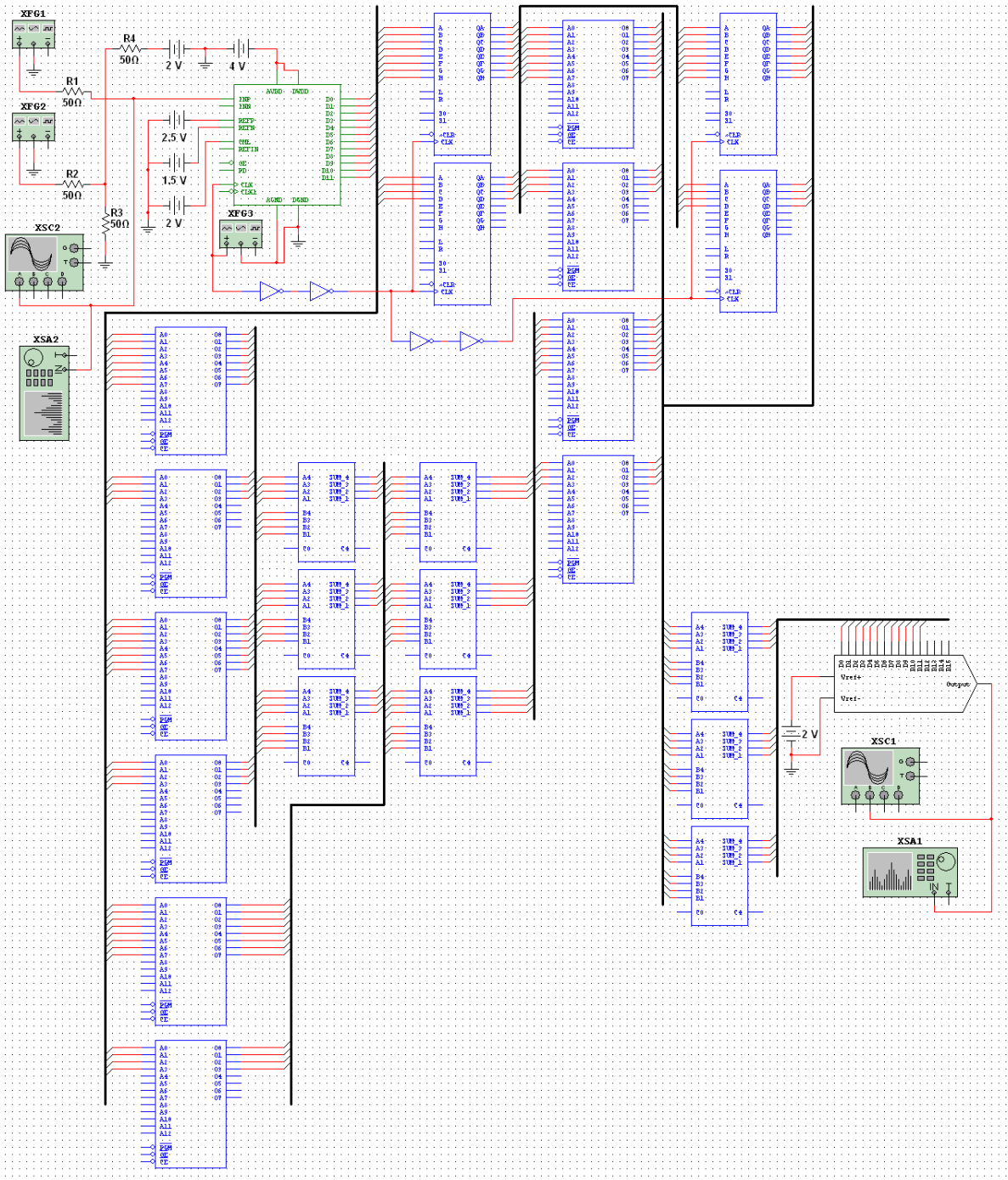
Додаток Б

Блок-схема алгоритму статистичного калібрування АЦП



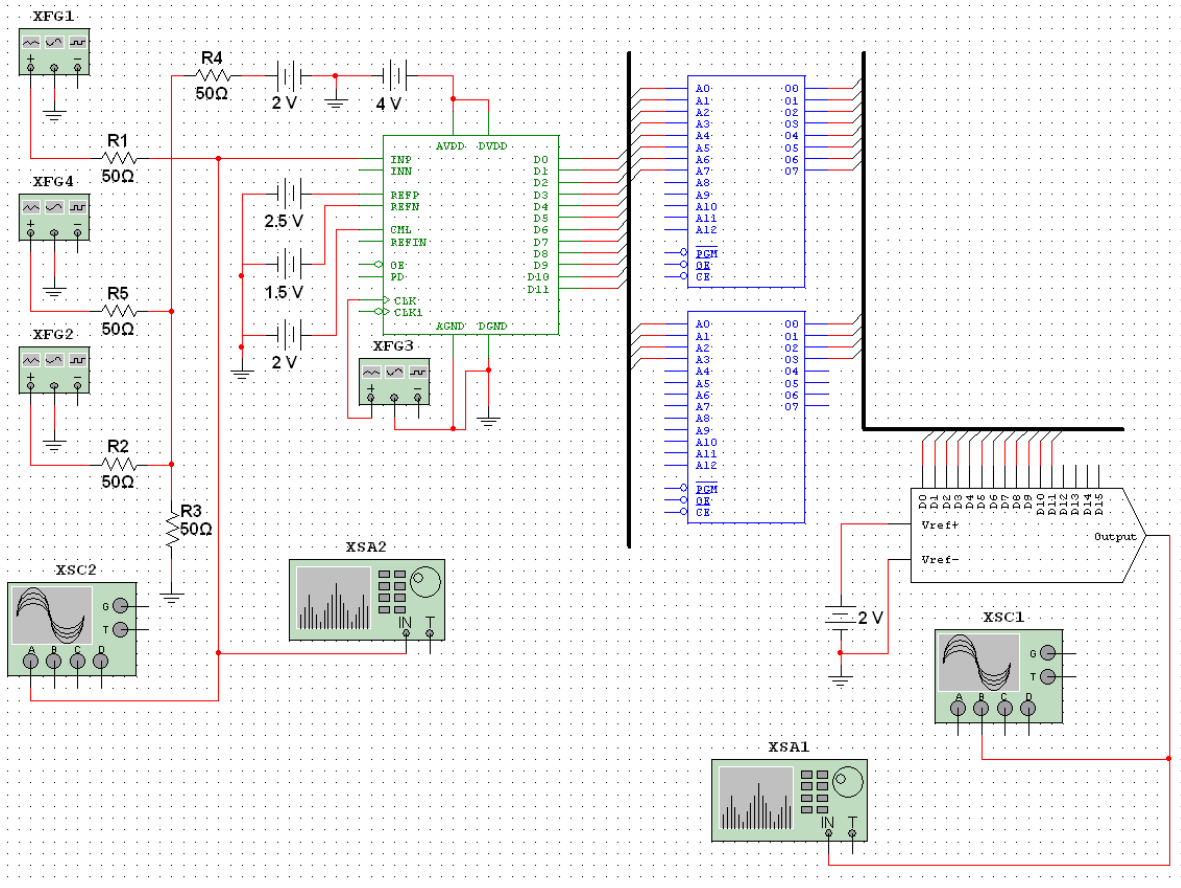
Додаток В

Моделювальна схема пристрою аналого-цифрового перетворення з фазо-площинним коригуванням

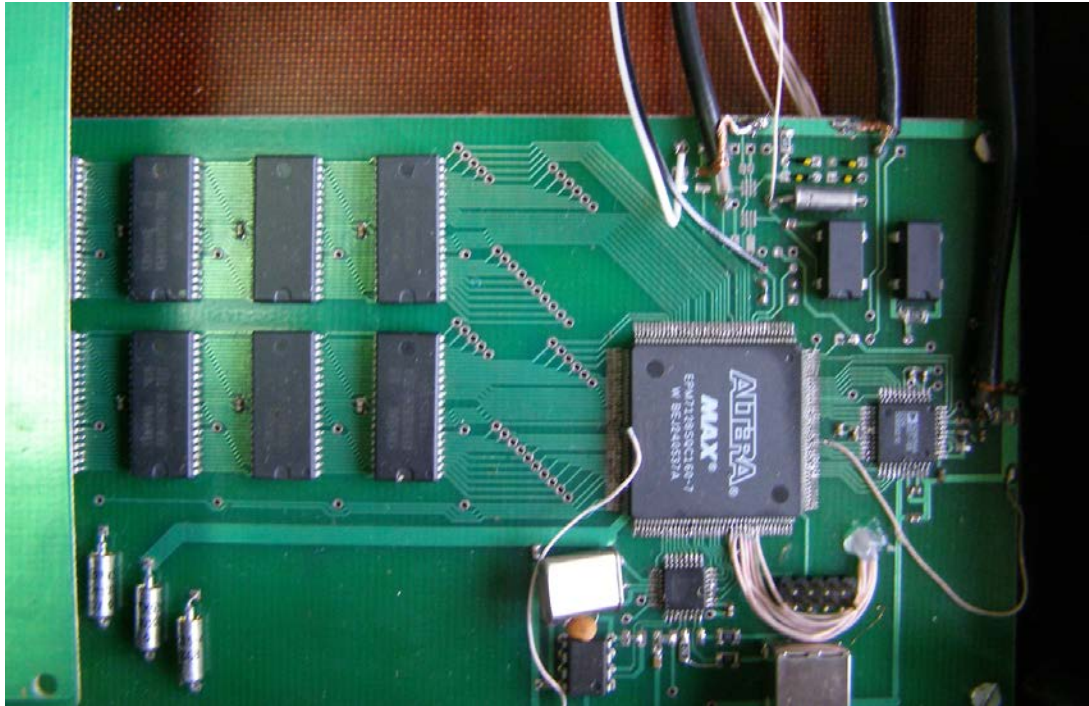


Додаток Г

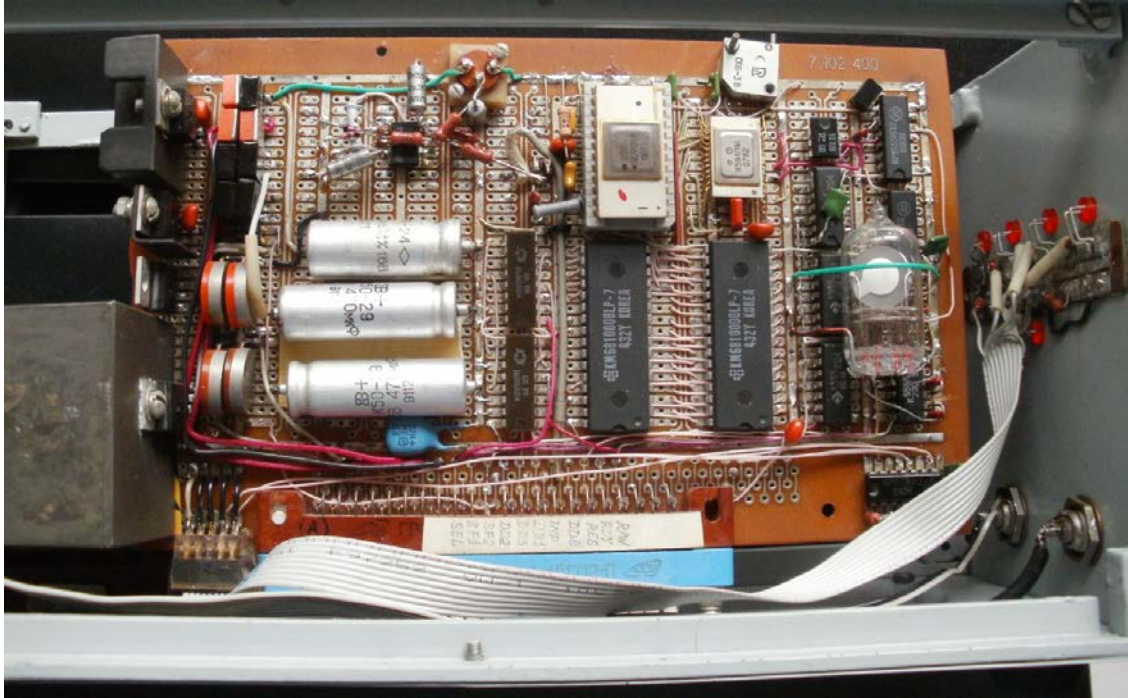
Моделювальна схема пристрою аналого-цифрового перетворення зі статистичним коригуванням



Додаток Д
Зовнішній вигляд макета пристрою аналого-цифрового
перетворення з фазо-площинним коригуванням



Додаток Е
Зовнішній вигляд макета пристрою аналого-цифрового
перетворення зі статистичним коригуванням



Наукове видання

**Бортник Геннадій Григорович
Бортник Сергій Геннадійович
Кичак Василь Мартинович**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВО-
РЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Г. Бортником

Підписано до друку 18.09.2013 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 7,39
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) Зам № 09-01

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.