

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

V. Romanov, I. Galelyuka

HIGH SPEED ADC TESTING AND EVALUATION

In the article it is listed the micro-electronic high-speed ADC parameters, which have to be tested and evaluated. It is shown, that at the manufacture it is expediently to use complicated and expensive equipments to evaluate parameters of high-speed ADC. But during designing of new devices on the base of high-speed ADC it is appropriate to use virtual tools for ADC parameters evaluating.

Розглянуті параметри сучасних мікроелектронних швидкодіючих АЦП, що підлягають тестуванню та оцінюванню. Показано, що в умовах виробництва доцільно використовувати складне і коштовне обладнання для тестування параметрів швидкодіючих АЦП, а при проектуванні нових пристроїв на основі цих АЦП доречно використовувати віртуальні засоби тестування та оцінювання їх параметрів.

© В.О. Романов, І.Б. Галелюка,
2007

УДК 381.3

В.О. РОМАНОВ, І.Б. ГАЛЕЛЮКА

ТЕСТУВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ШВИДКОДІЮЧИХ АЦП

Вступ. У сучасних електронних пристроях і приладах, засобах комп'ютерної техніки широко використовуються швидкодіючі АЦП у вигляді інтегральних мікросхем. Тому виникає потреба в методах тестування та оцінювання параметрів таких АЦП. У роботі на основі аналізу досвіду кращих світових виробників перетворювачів даних викладено загальні відомості про технічні і програмні засоби та методики тестування й оцінки параметрів сучасних швидкодіючих АЦП, а також наведено перелік параметрів АЦП, які можна оцінити. Слід зазначити, що більшість з розглянутих параметрів в українській технічній літературі до цього часу не використовується, а сучасні методики їх оцінки не застосовуються.

Загальні відомості. Для оцінки таких параметрів АЦП, як відношення сигнал/шум (SNR), відношення суми сигналу, шуму і спотворень до сумарного рівня шуму і спотворень (SINAD), динамічного діапазону неспотвореного сигналу (SFDR), інтермодуляційних спотворень (IMD) та інших характеристик у смузі робочих частот швидкодіючих АЦП використовуються комплекси спеціальних технічних і програмних засобів. На рис. 1 показано комплекс для тестування характеристик в динамічному режимі, який використовується в компанії Analog Devices та інших компаніях-виробниках перетворювачів даних [1]. Як правило, такі комплекси обов'язково містять прецизійні програмовані синтезатори сигналів, смуговий фільтр, реєстратор результатів тестування, джерело живлення з низьким рівнем шумів, кодуючий пристрій, модуль збору даних і прикладне

програмне забезпечення. Крім стандартних засобів, у склад комплексу входить налагоджувальний комплект для швидкодіючих АЦП виробництва компанії Analog Devices, який складається з двох оціночних плат. Перша містить АЦП, який підлягає тестуванню, а друга – FIFO-пам'ять для зберігання прикладного ПЗ і запису даних, які поступають від швидкодіючого АЦП. Структура цього налагоджувального комплексу показана на рис. 2 [1].

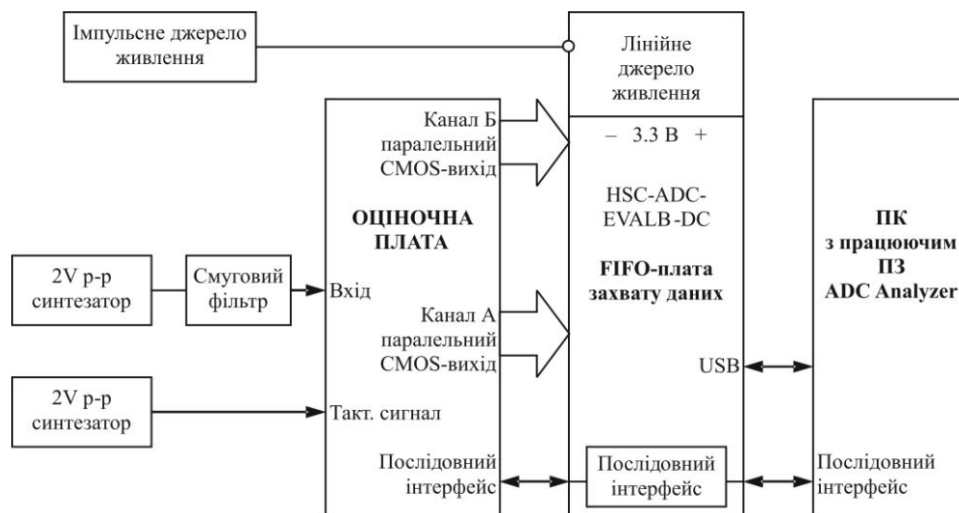


РИС. 1. Типовий комплекс для тестування параметрів швидкодіючих АЦП

Оціночна плата з FIFO-пам'яттю підключається до ПК через стандартний USB-порт і разом з прикладними ПЗ ADC Analyzer дозволяє швидко оцінювати параметри швидкодіючих АЦП, такі як SNR, SINAD, SFDR, IMD та ін.

Джерелами тактових і тестових сигналів можуть служити синтезатори фірми Rohde&Schwarz (www.rohde-schwarz.com), які забезпечують мінімальний фазний шум, високу рівномірність АЧХ і малі нелінійні спотворення в смузі частот від кількох кілогерц до одиниць гігагерц. Фільтр між синтезатором і АЦП дозволяє послабити додаткові гармоніки на вході АЦП, що досить важливо при оцінці параметрів високоякісних перетворювачів.

На вході АЦП можна використати ФНЧ або смуговий фільтр. ФНЧ використовують при дослідженні АЦП в широкій смузі частот вхідного сигналу. Смугові фільтри використовують у тому випадку, якщо АЦП досліджують у вузько-смуговому діапазоні. Затухання позасмугових сигналів ФНЧ складає -80 дБн, а смугового фільтру порядку -85 дБн. Для багатьох високоякісних перетворювачів цього недостатньо і тому необхідно використовувати каскади цих фільтрів для забезпечення затухання на рівні -100 дБн і більше.

При тестуванні АЦП слід використовувати якісний кварцовий генератор. Стандартні кварцові генератори з CMOS-виходом, які випускаються багатьма фірмами, мають тремтіння фронтів близько $0,3$ пс. Існує кілька фірм, які випус-

кають високоякісні кварцові генератори, котрі забезпечують апертурне тремтіння не гірше 0,07 пс (www.wenzel.com, www.tci-ant.com, www.valpeyfisher.com). Як вторинне джерело слід вибирати лінійний, а не імпульсний стабілізатор.

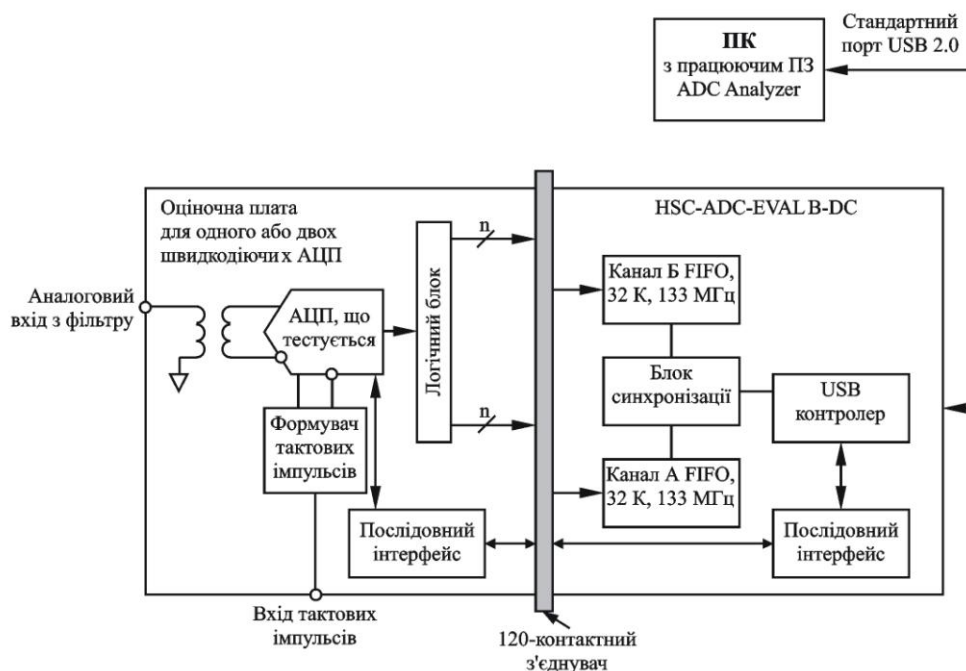


РИС. 2. Структура налагоджувального комплекту

Тестування та оцінювання параметрів АЦП. Тестування швидкодіючих АЦП здійснюється на змінному і постійному струмах.

Тестування на змінному струмі. Тестування на змінному струмі відбувається при номінальній частоті й амплітуді вхідного сигналу, яка на 1 дБ (в деяких випадках 0,1 або 0,5 дБ) менша за повну шкалу АЦП. Якщо використовуються інші значення амплітуди вхідного сигналу, то це вказується в технічному описі. Крім цього, в методиці тестування вказуються напруга живлення, температура оточуючого середовища тощо. При *тестуванні на змінному струмі* здійснюються наступні групи тестів:

1. *ШПФ-тестування.* Використовується когерентна вибірка (частота вибірки і частота вхідного сигналу синхронізовані) та некогерентна вибірка (частота вибірки і частота вхідного сигналу не синхронізовані).

2. *Однотональне ШПФ-тестування.* При цьому визначають такі параметри АЦП:

- Відношення сигнал/шум (SNR – Signal-to-Noise Ratio) – відношення середньоквадратичного значення вхідного сигналу до суми всіх середньоквадра-

тичних значень спектральних складових, крім перших шести гармонік і постійної складової (вимірюється в децибелах).

- Відношення сигнал/шум, приведене до повної шкали (SNRFS – Signal-to-Noise Ratio Full-Scale) – відношення середньоквадратичного значення вхідного сигналу, рівного повній шкалі перетворювача, до суми всіх середньоквадратичних значень спектральних складових крім перших шести гармонік і постійної складової. Різниця SNR і SNRFS визначається різницею між повною шкалою АЦП та амплітудою вхідного сигналу АЦП, для якого вимірювалося відношення SNR (вимірюється в децибелах від повної шкали).

- Відношення сигнал/шум плюс спотворення (SINAD – Signal-to-Noise and Distortion) – відношення середньоквадратичного значення вхідного сигналу до суми всіх середньоквадратичних значень спектральних складових, крім постійної складової. Різниця відношення SINAD від SNR полягає у відсутності в останній енергії спектральних складових перших шести гармонік (вимірюється в децибелах).

- Відношення сигнал/шум, яке визначається користувачем (UDSNR – User-Defined Signal-to-Noise Ratio) – це поняття використовується в ПЗ ADC Analyzer і являє собою відношення середньоквадратичного значення вхідного сигналу до суми всіх середньоквадратичних значень спектральних складових, крім перших шести гармонік і постійної складової, причому смуга частот, в якій обчислюється це відношення, задається користувачем (вимірюється в децибелах).

- Коефіцієнт шуму (NF – Noise Figure) – відношення потужності шуму на виході АЦП до потужності шуму на його вході (вимірюється в децибелах).

- Рівень власних шумів (Noise Floor) – це відношення використовується в описі ПЗ ADC Analyzer і визначається як $SNRFS - 10\log(FFT\ Bins / 2)$, де $FFT\ Bins$ – елемент дискретизації при ШПФ (вимірюється в децибелах від повної шкали).

- Ефективне число двійкових розрядів (ENOB – Effective Number of Bits) – вчислюється з формули $ENOB = (SINAD - 1.76) / 6.02$ (вимірюється в бітах).

- Динамічний діапазон неспотвореного сигналу (SFDR – Spurious-Free Dynamic Range) – відношення середньоквадратичного значення вхідного сигналу до максимального середньоквадратичного значення паразитної спектральної складової на вході АЦП, яка приводить до зміни вихідного коду. В більшості випадків SFDR – це максимальний гармонічний сигнал на вході АЦП, який кодується без спотворень (вимірюється в децибелах від несучої).

- Гармонічні або нелінійні спотворення (Harmonic Distortion) – відношення середньоквадратичного значення вхідного сигналу до середньоквадратичного значення паразитних гармонік. Так як АЦП є нелінійним пристроєм, то на його виході можуть бути присутні паразитні гармоніки. Як правило, гармонічні спотворення оцінюються по перших трьох або перших шести гармоніках (вимірюється в децибелах від повної шкали або несучої).

- Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (Total Harmonic Distortion) – відношення середньоквадратичного значення вхідного сигналу до суми серед-

ноквадратичних значень перших шести гармонік (вимірюється в децибелах від несучої).

- Образ нелінійних спотворень (Harmonic Image) – характеризує гармонічні спотворення двох або декількох перетворювачів, які по черзі кодуєть один і той же вхідний сигнал. Дані спотворення залежать від величини розузгодження синхроімпульсів по фазі кожного АЦП. Показник визначається відношенням середньоквадратичного значення вхідного сигналу до суми середньоквадратичних значень негармонійних складових у спектрі вихідного коду (вимірюється в децибелах від несучої).

3. *Двохтональне ШПФ-тестування.* Якщо АЦП кодує мультитональні сигнали, то внаслідок його нелінійності на виході можуть бути присутні інтермодуляційні спотворення (IMD). Двохтональне тестування дозволяє оцінити ці спотворення. В зв'язку з тим, що паразитні спектральні складові можуть виходити за границі спектру вхідного аналогового сигналу, їх також потрібно враховувати при оцінці паразитних складових. Вони можуть бути представлені у вигляді $(F1 + F2)$ [дБн] або $(F1 - F2)$ [дБн], де $F1$ і $F2$ – дві частоти вхідного двохтонального сигналу.

При двохтональному ШПФ-тестуванні визначають такі параметри АЦП:

- Точка перетину другого порядку (IP2 – Second-Order Input Intercept Point) – визначається шляхом вирахування з потужності максимального вхідного сигналу потужності інтермодуляційних спотворень другого порядку (вимірюється в децибелах і відраховуються відносно рівня 1 мВт).

- Спотворююче зображення третього порядку $2F1 \pm F2$ і $2F2 \pm F1$, яке визначають як відношення середньоквадратичних значень зображень $2F1 \pm F2$ і $2F2 \pm F1$ до середньоквадратичного значення одного з двох вхідних сигналів $F1$ або $F2$ (вимірюється в децибелах від несучої).

- Точка перетину третього порядку (IP3 – Third-Order Input Intercept Point) – визначається шляхом вирахування з потужності максимального вхідного сигналу половини потужності інтермодуляційних спотворень третього порядку (вимірюється в децибелах відносно рівня 1 мВт).

- Інші спотворення (WoSpur) – визначаються як відношення середньоквадратичного значення спотворень (які не належать до спотворень другого і третього порядків) до середньоквадратичного значення одного з двох вхідних сигналів $F1$ або $F2$ (вимірюється в децибелах від несучої).

- Двохтональний динамічний діапазон неспотвореного сигналу (Two-Tone SFDR) – визначається як відношення середньоквадратичного значення вхідного сигналу до середньоквадратичного значення максимальної спектральної компоненти, яка спотворює результат перетворення. В більшості випадків вхідним сигналом АЦП при визначенні даного параметра є синусоїдальний сигнал.

4. *Відношення потужності шуму на виході АЦП з фільтрацією шуму на вході до потужності шуму на виході АЦП без фільтрації шуму на вході* (NPR – Noise Power Ratio). Цей тест використовується для оцінки АЦП, на вхід якого подається гаусів шум у смузі частот перетворення. Рівень шумів у смузі частот регулюється так, щоб не перевищувати частоту Найквіста, на якій починається

обмеження смуги вхідного сигналу. Потім шум на вході АЦП послаблюється вузькосмуговим режекторним фільтром з регульованою смугою. За допомогою ШПФ-тестування визначається відношення щільності шуму на виході АЦП у смузі вузькосмугового фільтру до щільності шуму поза смугою цього фільтру.

5. *Смуга вхідного сигналу повної потужності* (Full Power Bandwidth). Вимірюється в мегагерцах в області високих частот і визначається за допомогою ШПФ-тестування як частота зрізу, тобто на цій частоті сигнал повної потужності зменшується на 3 дБ.

6. *Тестування АЦП шляхом підмішування випадкового сигналу* (Dither testing). Прикладаючи до входу АЦП додатковий шумовий сигнал, можна зменшити вплив статичних спотворень на передаточну функцію перетворювача за рахунок подальшої обробки результатів кодування. Метод підмішування дозволяє локалізувати похибки АЦП. Є два види підмішування шуму: широкосмуговий і поза смугою пропускання АЦП. Переваги цього методу можуть бути продемонстровані за допомогою віртуальної моделі АЦП ADIsimADC і ПЗ ADC Analyzer [2, 3].

7. *Вхідні параметри АЦП* (Analog Input).

- Вхідний імпеданс (Analog Input Impedance) – відношення вхідної комплексної напруги до вхідного комплексного струму перетворювача.

- Коефіцієнт стоячої хвилі на вході (VSWR – Voltage Standing Wave Ratio) – визначається потужністю сигналу відбиття на вході АЦП.

8. *Динамічний діапазон вхідного сигналу повної потужності АЦП* (V_{R-P} – Analog Input Full-Scale Range). Сигнал повної потужності (симетричний або несиметричний) прикладається до входу АЦП і оцінюється достовірність результатів кодування.

9. *Діапазон вхідного синфазного сигналу* (Common-Mode Input Range). Вимірюється у вольтах і представляє собою максимально допустимі напруги постійного струму, які прикладаються до обох входів перетворювача з симетричним (диференціальним) вхідним каналом.

10. *Коефіцієнт послаблення синфазного сигналу* (CMRR – Common-Mode Rejection Ratio). Вимірюється в децибелах і визначається як послаблення на виході АЦП синфазного сигналу, який прикладається до входу АЦП.

11. *Апертурна затримка* (Aperture Delay). Вимірюється в пікосекундах як час затримки між сигналом вибірки і сигналом кінця перетворення.

12. *Апертурна невизначеність або апертурне тремтіння* (Aperture Jitter or Aperture Uncertainty); (вимірюється в пікосекундах). Ця невизначеність викликана тим, що при кодуванні змінного сигналу неможливо абсолютно точно зафіксувати момент початку процесу кодування. В АЦП з УВХ апертурна невизначеність визначається часом переходу ключа з режиму слідкування в режим зберігання. В паралельних або флеш-АЦП апертурна невизначеність визначається часом спрацювання компараторів.

13. *Рівень перехресних завад* (Crosstalk); (вимірюється в децибелах). Цей параметр може бути виміряний двома способами. У першому випадку на будь-який з каналів багатоканального АЦП (який знаходиться в замкнутому стані)

подається вхідний сигнал повної потужності та базової частоти і запам'ятовується його цифровий еквівалент. Потім цей же сигнал по чергові подається на інші розімкнуті канали багатоканального АЦП і результати кодування запам'ятовуються. Коефіцієнт послаблення перехресної завади вираховується як відношення першого і найгіршого другого результатів кодування. В другому випадку на вхід багатоканального АЦП подаються сигнали з перерегулюванням 3 дБ, а процес вирахування коефіцієнта послаблення перехресної завади виконується аналогічно першому випадку.

14. *Шум, приведений до входу* (Input-Referred Noise); (вимірюється в ОМР). Обчислення шуму, приведенного до входу, здійснюється при заземленому вході АЦП. При цьому будується гістограма розподілу цього шуму [2].

15. *Час відновлення АЦП після перерегулювання* (Out-of-Range Recovery Time); (вимірюється кількістю тактів). На вхід АЦП подається сигнал з перерегулюванням, який на 10 % вище максимально допустимого. Після чого подається сигнал повної потужності і відбувається його кодування. Час відновлення – це час, необхідний перетворювачу для забезпечення номінальної точності кодування даного сигналу після перерегулювання.

16. *Часові параметри АЦП на змінному струмі.*

- Мінімальна частота перетворення (Minimum Converter Rate) – вимірюється в мільйонах вибірок за секунду і визначається як частота, на якій відношення SNR падає нижче гарантованої межі на 3 дБ.

- Максимальна частота перетворення (Maximum Converter Rate) – вимірюється в мільйонах вибірок за секунду і визначається як частота, за якої здійснено тестування АЦП. Вище цієї частоти метрологічні параметри, наведені в технічному описі, не гарантуються.

- Затримка конвеєрного АЦП (Pipeline Delay) – вимірюється числом тактів. Ця затримка характерна для конвеєрних АЦП, в яких результат першого перетворення з'являється не в першому такті, а через декілька тактів, після чого результати з'являються в кожному такті перетворення.

- Затримка розповсюдження (Propagation Delay) – вимірюється в наносекундах і являє собою часовий інтервал між тактовим імпульсом запуску і встановленими логічними сигналами вихідного коду АЦП.

- Тривалість сигналу вибірки або циклу кодування (Encode Pulse Width or Encode Duty Cycle) – це мінімальний час, за який здійснюється кодування вхідного сигналу. Розрізняють мінімальну тривалість позитивного і негативного стану сигналу вибірки. У першому випадку відбувається вибірка, а в другому – кодування вхідного сигналу. Для багатьох АЦП нормується не тривалість вибірки і кодування, а тривалість циклу кодування. Цей час обернено пропорційний максимальній частоті вибірки. Для визначення цього параметра необхідно, щоб при кодуванні сигналу повної потужності відношення SNFRS відрізнялося від заданого не більше ніж на 3 дБ.

17. *Похибки перетворення АЦП із-за перевищення заданої частоти вибірки* (CER – Conversion Error Rate). Цей параметр вимірюється при збільшенні частоти кодування до тих пір, поки рівень шуму на виході АЦП не перевищить зада-

ний. Допустиме значення SNR вказано в технічному описі. Реальне значення цього відношення можна отримати шляхом тестування. Виходячи з того, яка імовірність помилки прийнята (довірчий інтервал 3, 4 або 6 σ), можна встановити, чи відповідає АЦП, який проходить тестування, цим вимогам.

Тестування АЦП на постійному струмі. Передбачає тести для визначення наступних характеристик:

1. *Похибка в крайній точці шкали (Gain Error).* Це зведена відносна похибка АЦП в крайній точці шкали, яка виражена у відсотках.

2. *Розузгодження в крайній точці шкали (Gain Matching).* Нормується у відсотках для багатоканальних АЦП.

3. *Зведена похибка зсуву нуля (Offset Error).* Нормується у відсотках.

4. *Розузгодження у початковій точці шкали (Offset Matching).* Нормується в мілівольтах для багатоканальних АЦП. Визначається як різниця максимального позитивного зсуву нуля в одному з каналів багатоканального АЦП і мінімального від'ємного зсуву нуля в одному з каналів багатоканального АЦП.

5. *Температурний дрейф (Temperature Drift).* Нормується в ppm (part per million) при температурі 25 °С. Це температурний дрейф напруги зсуву нуля і відхилення в крайній точці шкали в робочому діапазоні температур щодо значень даних параметрів.

6. *Високий / низький рівень вихідного сигналу.* Високий рівень вихідного сигналу (VOH) – напруга, яка відповідає високому логічному рівню (наприклад, логічній одиниці). Низький рівень вихідного сигналу (VOL) – напруга, яка відповідає низькому логічному рівню (наприклад, логічному нулю). Тестування проводиться на тестових сигналах постійного струму або тестових сигналах дуже низьких частот.

7. *Лінійність (Linearity).* Характеризується диференціальною і інтегральною нелінійностями.

- Диференціальна нелінійність (DNL). Вимірюється між двома сусідніми кодами аналого-цифрового перетворення.

- Інтегральна нелінійність (INL). Визначається як максимальне відхилення реальної передаточної характеристики від її ідеального значення

- Пропуски кодів (Missing Code). Якщо диференціальна нелінійність перевищує 1 OMR, то має місце пропуск коду, тобто зі зміною вхідного сигналу АЦП на величину, яка перевищує одиницю молодшого розряду, код на виході перетворювача залишається попереднім. Таким чином, якщо в технічному описі вказано, що пропуски кодів відсутні, але диференціальна нелінійність перевищує 1 OMR, то це свідчить про некоректність такого опису.

8. *Коефіцієнт послаблення нестабільності джерела живлення (PSRR – Power Supply Rejection Ratio).* Нормується в децибелах. Вимірюється, наприклад, шляхом зміни значення напруги живлення і подальшої зміни напруги зсуву нуля АЦП, виражається у відсотках від повної шкали. Але в більшості випадків коефіцієнт PSRR вимірюються шляхом додавання до напруги живлення змінної складової і наступним ШПФ-тестуванням вихідних кодів АЦП. Коефіцієнт пос-

лаблення вираховується шляхом відношення гармонічної складової в колі живлення до гармонічної складової тієї ж частоти на виході АЦП.

Таким чином, розглянуті методи тестування та оцінювання основних параметрів сучасних швидкодіючих АЦП на змінному і постійному струмах. Зазначимо, що більшість з нормованих параметрів сучасних АЦП відрізняється від прийнятих у вітчизняній літературі. Як впливає з аналізу, для тестування й оцінки параметрів швидкодіючих АЦП за кордоном використовується коштовна вимірювальна апаратура, яка, як правило, відсутня у вітчизняних розробників пристроїв і систем збору даних на основі таких АЦП, що заважає розповсюдженню цих методів в Україні.

У зв'язку з цим для тестування й оцінки параметрів швидкодіючих АЦП пропонується використовувати віртуальні оціночні плати ADIsimADC, Register Configuration Tools та інші, які є складовою частиною віртуальної лабораторії автоматизованого проектування [2]. Зокрема, засоби моделювання поведінки АЦП ADIsimADC входять в склад ПЗ ADC Analyzer і підтримуються такими пакетами як MATLAB, C++, LabVIEW, Signal Express, ADS і Applied Wave Research's Visual System Stimulator. Віртуальна оціночна плата ADIsimADC дозволяє оцінити параметри конкретного АЦП на його моделі без використання складних і коштовних апаратних засобів [3].

1. *Брэннон Б., Ридер Р.* Средства тестирования и методы оценки параметров ИМС быстродействующих АЦП // ЭКис – Киев: VD MAIS, 2007. – № 4. – С. 3–12.
2. *Palagin O. V., Galelyuka I. B., Romanov V. O.* Structure and organization of typical Virtual Laboratory for Computer-Aided Design // Proceeding of the Third IEEE Workshop on "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications", IDAACS'2005. – Sofia, Bulgaria, 2005, September 5–7. – P. 460–463.
3. *Галелюка И.* Как виртуальная плата ADIsimADC моделирует поведение преобразователей данных // ЭКис – Киев: VD MAIS, 2006. – № 6. – С. 8–11.

Отримано 04.06.2007