

УДК 681.3

О. Д. Азаров, д-р техн. наук, проф.;**О. В. Дудник**, асп.;**Л. В. Крупельницький**, канд. техн. наук, доц.

БАГАТОРОЗРЯДНІ АЦП СЛІДКУВАЛЬНОГО ТИПУ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ, ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ

Проаналізовано підходи щодо структурно-функціональної організації та проектування аналогової й цифрової частин багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються. Запропоновано підхід щодо побудови ЦАП із ваговою надлишковістю на основі декількох ЦАП класичної двійкової системи числення. Оцінено характеристики макетного зразка багаторозрядного АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібрується. Доведено, що застосування самокалібрування в такому АЦП дає змогу забезпечити похибку перетворення пристрою на рівні одиниць молодших розрядів.

Вступ

Переважає більшість сучасних перетворювачів форми інформації ПФІ, створених у вигляді АЦП і ЦАП, реалізується з використанням класичної двійкової системи числення [1]. Водночас усі багаторозрядні (12 і більше двійкових розрядів) ЦАП без вживання спеціальних заходів, по суті, є неточними, оскільки їхня кінцева похибка перетворення не відповідає заявленій роздільній здатності [2—5]. Це призводить до погіршення характеристик АЦП, що містять такі ЦАП. Водночас побудова ПФІ на базі систем числення із ваговою надлишковістю [6] дозволяє комплексно вирішувати проблеми підвищення їх швидкодії й точності.

Актуальність

АЦП слідкувального типу відносяться до компенсаційних ПФІ. Відносно «повільна» реакція такого типу АЦП на швидкі зміни вхідного сигналу роблять їх непридатними для багатьох галузей застосування, зокрема, в багатоканальних системах перетворення, реєстрування й опрацювання аналогових величин [1]. Водночас, перевагами цього типу АЦП є те, що код на виході такого перетворювача доступний на кожному такті перетворення. Ця властивість особливо важлива для перетворювачів сельсин—код та резольвер—код. Іншою цінною характеристикою АЦП слідкувального типу є те, що швидкі перехідні процеси на вході перетворювача викликають зміну вихідного коду лише на одиницю молодшого розряду. Це досить важливо у разі наявності шумів у системі опрацювання сигналів.

Основними джерелами статичних похибок багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на неточному ЦАП, є відхилення параметрів аналогових елементів від своїх номінальних значень. Водночас застосування технологічних прийомів для забезпечення точності ЦАП в широкому діапазоні температур і протягом циклу експлуатації дозволяє створювати лише 12-розрядні перетворювачі за точністю [7—8], а використання самокалібрування є досить складним у випадку побудови ЦАП на основі класичної двійкової системи числення. Водночас, побудова багаторозрядних АЦП слідкувального типу на основі неточного ЦАП із ВН дозволяє значно підвищити точність такого перетворювача за рахунок використання спрощеної процедури самокалібрування (СК) [9].

У науково-технічній літературі підходи щодо проектування багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються, практично не розглянуто. Тому тема статті з дослідження багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються, є актуальною.

Метою досліджень є підвищення точності багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на низькоточній елементній базі, шляхом використання специфічної процедури самокалібрування у випадку застосування ЦАП із ВН.

Постановка задач

1. Аналіз підходів щодо структурно-функціональної організації багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються.
2. Аналіз підходів щодо проектування аналогової та цифрової частини багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються.
3. Оцінювання статичних характеристик багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються.
4. Аналіз варіантів схемотехнічної реалізації цифрових та аналогових вузлів згаданого класу ПФІ.

Розв'язання задач

У процесі проектування АЦП слідкувального типу із ВН, окрім серійних електронних компонентів, які є універсальними і не орієнтовані на вузьке коло спеціалізованих задач, використовуються компоненти, які є специфічними для цієї розробки і потребують детального розгляду. Розглянемо структуру багаторозрядного АЦП слідкувального типу із ВН, що самокалібрується (рис. 1) [10]. Реалізація ЦАП, що самокалібрується, по суті, в певній мірі вимагає повторення структури АЦП, оскільки схема такого ЦАП має містити схему порівняння, джерело калібрувальних сигналів та блок керування.

При цьому АЦП, що містить такий ЦАП, працює в двох режимах: основного перетворення і самокалібрування. Для реалізації калібрування структурна схема АЦП повинна містити такі блоки: α -ЦАП—ЦАП із ВН, схему порівняння (СП), за допомогою якої вихідний аналоговий сигнал ЦАП можна було б врівноважити калібрувальним сигналом $A_{\text{кл}}$, регістр послідовного наближення (РПН), цифровий обчислювальний пристрій (ЦОП), що виконує необхідні обчислення, генератор калібрувального сигналу (ГКЛС), блок керування (БК), аналоговий комутатор (АК), що підключає до СП вхідний сигнал та сигнал із ГКЛС залежно від режиму роботи АЦП, ЛПЧ — лічильник, блоки постійної (БПП) і оперативної пам'яті (БОП) для зберігання двійкових кодів ваг розрядів α -ЦАП.

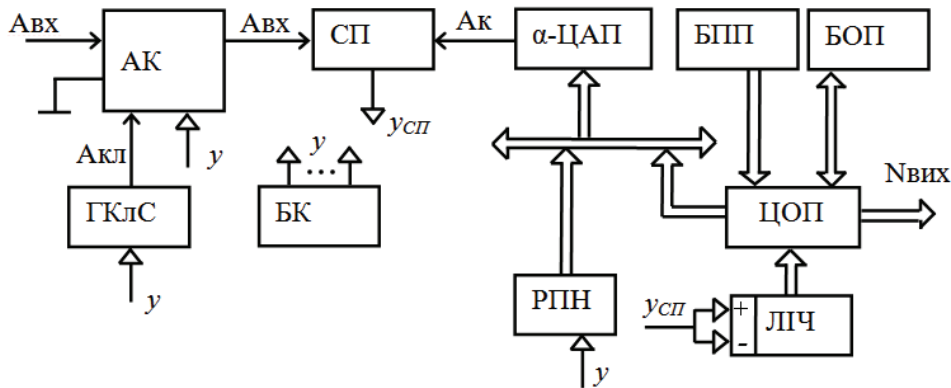


Рис. 1. Структурна схема АЦП слідкувального типу, що самокалібрується з ВН

Слід зазначити, що побудова ПФІ на основі систем числення із ВН (СЧВН) вимагає створення дещо специфічної елементної бази (зокрема α -ЦАП). Водночас альтернативним підходом щодо побудови ЦАП із ВН є використання декількох ЦАП класичної двійкової системи числення [4]. Останнє дає можливість проектувати надлишкові ЦАП і АЦП з покращеними статичними і динамічними характеристиками на базі традиційних двійкових ЦАП та не вимагає створення оригінальної елементної бази.

Автори пропонують для реалізації ЦАП із ВН використовувати структуру на основі двох та більше двійкових ЦАП, суматора і відповідних масштабних блоків (рис. 2) [11]. Тут $\text{ЦАП}_1, \text{ЦАП}_2, \dots, \text{ЦАП}_N$ — N двійкових ЦАП, Σ — суматор, M_1, \dots, M_{N-1} — масштабні дільники. Перевагами такого підходу є використання змінних масштабних дільників, а також програмне завдання ваг

розрядів ЦАП із ВН як певної суми ваг розрядів двійкових ЦАП, що дає можливість побудови ЦАП із ВН із наперед заданою основою системи числення із ВН.

При цьому матимемо такий ряд ваг розрядів:

$$r = \left\{ 1; 2^1; \dots; 2^N; \frac{1}{M_1}; \frac{2^1}{M_1}; \dots; \frac{2^n}{M_1}; \dots; \frac{1}{M_{N-1}}; \frac{2^1}{M_{N-1}}; \dots; \frac{2^n}{M_{N-1}} \right\},$$

де n — розрядність двійкових ЦАП.

Задання значень ваг розрядів у СЧВН автори пропонують здійснювати через використання «масок», які вказують, сума яких ваг двійкових розрядів із ряду r сформулюють вагу розряду СЧВН.

Маску ваги одного розряду у СЧВН можна представити як

$$m_i = \{1_0, 0_1, \dots, 0_k\},$$

де k — кількість членів ряду r .

При цьому сформований таким чином ряд ваг розрядів СЧВН можна представити як

$$v = \{m_0 \cdot r, m_1 \cdot r, \dots, m_p \cdot r\} = \{Q_0, Q_1, \dots, Q_p\},$$

де m_i — маска i -го розряду ЦАП із ВН; p — розрядність ЦАП із ВН; Q_i — вага i -го розряду ЦАП із ВН.

Оскільки похибка ПФІ суттєво залежить від чутливості та швидкості роботи СП [12], тому під час побудови багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються, виникає необхідність використання високочутливого компаратора. Для вказаних цілей автори пропонують використовувати підхід, що передбачає композицію підсилювача різниці струмів ΔI (рис. 3) та власне серійного компаратора напруг. Причому підсилювач ΔI використовується в режимі перетворювач струм—напруга. При цьому на його виході формується сигнал $\Delta U_{\text{вих}} = \Delta I_{\text{вх}} \cdot R_N$.

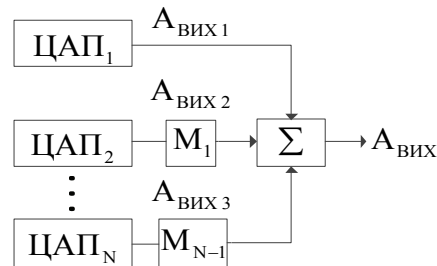


Рис. 2. ЦАП із ВН на базі N двійкових ЦАП

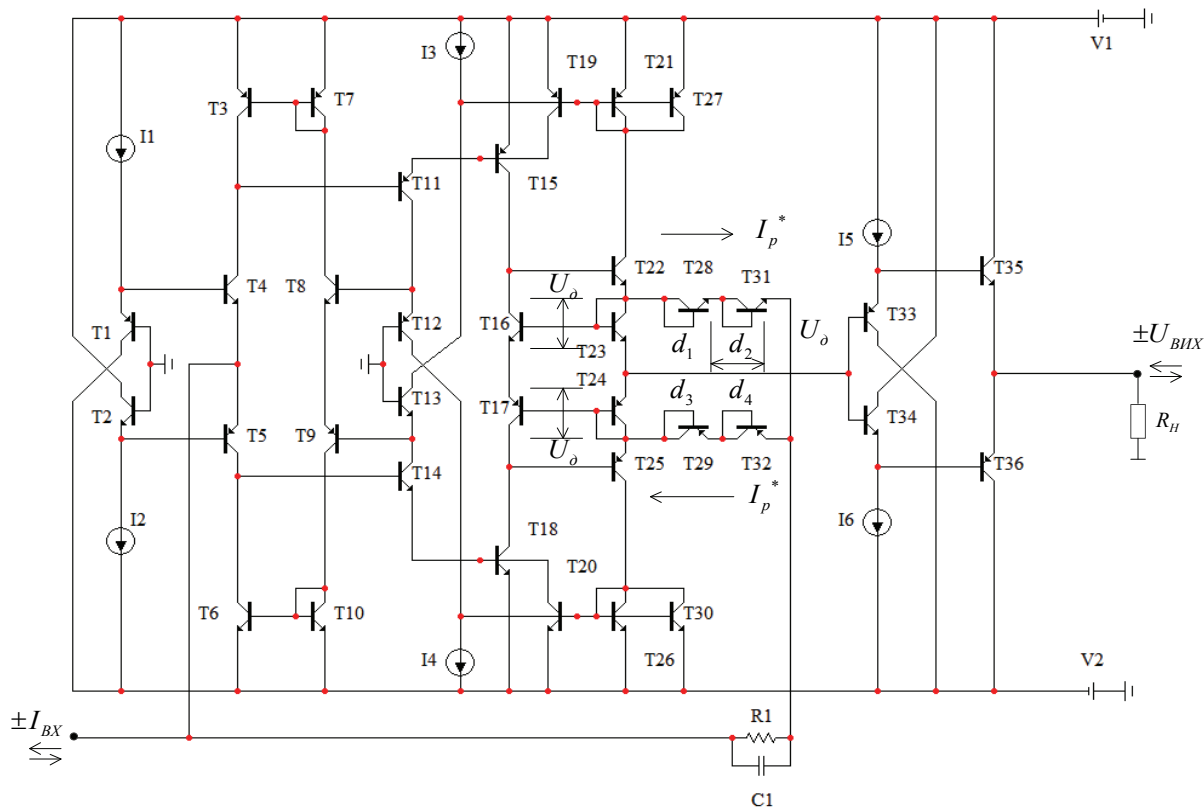


Рис. 3. Схема підсилювача різниці для високочутливого компаратора струму

Статичні та динамічні характеристики схеми (рис. 3) показані на рис. 4, 5.

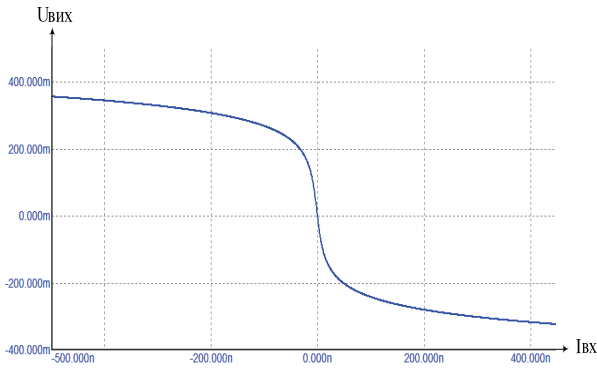


Рис. 4. Статична характеристика підсилювача різниці для компаратора напруг

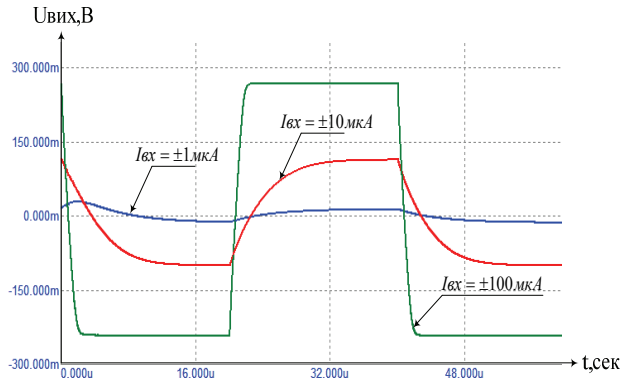


Рис. 5. Перехідна характеристика схеми порівняння струмів, коли $I_{вх} = \pm 1 \text{ мкА}; \pm 10 \text{ мкА}; \pm 100 \text{ мкА}$

При цьому $U_{ВІХ} = 2\phi_T \cdot \ln \frac{I_{ВХ}}{I_p^*}$, де $I_p^* = I_0 \cdot e^{\frac{U_d}{\phi_T}} \approx I_0 \cdot e^{2 \cdot \phi_T}$ — струм спокою, що протікає через

привідкриті діоди d_1, d_2 або d_3, d_4 , якщо $I_{ВХ} = 0$. Коли ж $I_{ВХ} \sim I_p^*$, то $U_{ВІХ} = 2r_d I_{ВХ}$, де

$$r_d = \frac{\phi_T}{I_p^*}.$$

Генератор калібрувального сигналу АЦП слідкувального типу із ВН використовується для визначення ваг «неточних» розрядів та може бути реалізований як інтегратор на базі операційного підсилювача (рис. 6а, 7) або ж як неточний ЦАП на основі СЧВН із схемою керування (рис. 6б). При цьому під «неточними» вважаються такі ваги розрядів, що їх абсолютні відхилення перевищують половину молодшого кванта [7]. На рис. 7 $U(Q_i), U(Q_{i-1}), U(Q_{i-2})$ — напруги що відповідають вагам i -го, $(i-1)$ -го, $(i-2)$ -го розрядів, відповідно.

Авторами пропонується використовувати саме останній варіант побудови ГКЛС, оскільки така схема дозволяє організувати вибіркоче встановлення рівня калібрувального сигналу у процесі врівноваження ваг розрядів Q_i та вхідного аналогового сигналу $A_{ВХ}$.

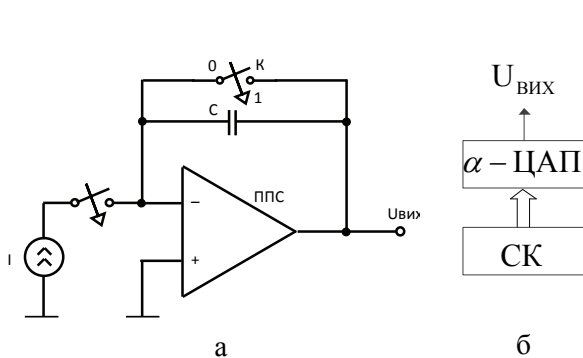


Рис. 6. Варіанти побудови ГКЛС: а — на базі інтегратора; б — на базі ЦАП із ВН

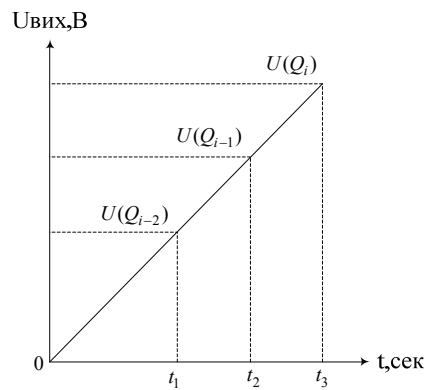


Рис. 7. Формування калібрувальних сигналів у ГКЛС на базі інтегратора

Розглянемо підходи щодо проектування цифрової частини багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються. Так, реалізація оригінальної цифрової частини, що, як правило, пов'язана з мікросхемами малого та середнього ступеня інтеграції ускладнює монтаж, знижує надійність та швидкодію системи [6]. Водночас розробка оригінальних великих та надвеликих інтегральних схем — надзвичайно дорогий та тривалий процес.

Для вирішення цих проблем доцільно використовувати програмовані логічні структури, що дозволяють змінювати апаратну реалізацію мікросхем, не вдаючись до технологічного циклу виготов-

лення компонентів. Однією з перших таких технологій, що набула широкої популярності, було використання базових матричних кристалів (БМК). Водночас завдяки наявності різних систем автоматизованого проектування, а також структурним і технологічним особливостям програмовані логічні структури (ПЛІС) представляють технологію рекорднокороткого циклу розробки радіоелектронної апаратури. Причому весь цикл проектування й виготовлення готового обладнання здійснюється самим розроблювачем, що значно знижує вартість пристроїв порівняно з використанням БМК [13].

Реалізацію цифрової частини АЦП слідкувального типу з ВН, що самокалібрується, авторами запропоновано здійснювати на основі ПЛІС. З усієї номенклатури ПЛІС перевагу було надано виробам фірми Altera. Це пов'язано з доступним програмним пакетом для програмування таких ПЛІС — Quartus II, робота з яким легко може бути освоєна за наявності доступної літератури на цю тему та служби підтримки виробника [14].

Конкретну реалізацію ЦОП доцільно здійснювати на кристалах ПЛІС, що містять вбудовані блоки пам'яті та можуть бути використані як БПП та БОП. У рамках цього дослідження використовувалась ПЛІС сімейства Cyclone III (рис. 8).

Схеми цього класу містять до 120 тисяч вбудованих логічних елементів, до 4 мегабіт вбудованої пам'яті, до 288 вбудованих помножувачів та до 535 ліній введення виведення.

Варто зазначити, що окрім ЦОП, БОП та БПП в рамках цього дослідження на одному кристалі ПЛІС було реалізовано також контролери АК, СП, α -ЦАП та ГКЛС.

Так, функціональна схема цифрової частини багаторозрядних АЦП слідкувального типу з вагою надлишковістю, що самокалібруються, має вигляд, наведений на рис. 9. Тут $K\alpha$ -ЦАП — контролер α -ЦАП, ГКЛС — контролер генератора калібрувального сигналу, КСП — контролер схеми порівняння, КАК — контролер аналогового комутатора.

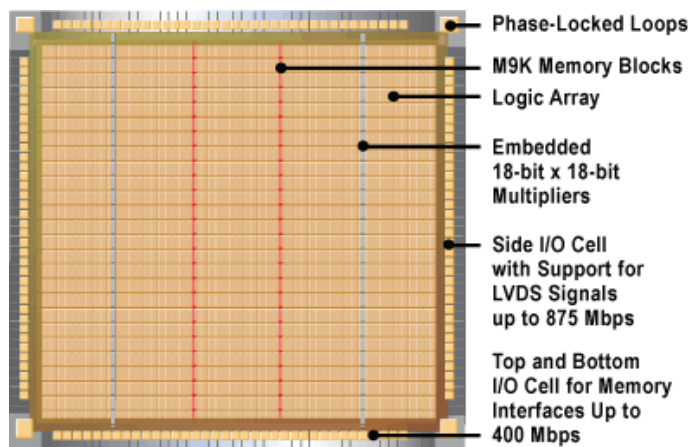


Рис. 8. Топологія ПЛІС сімейства Cyclone III

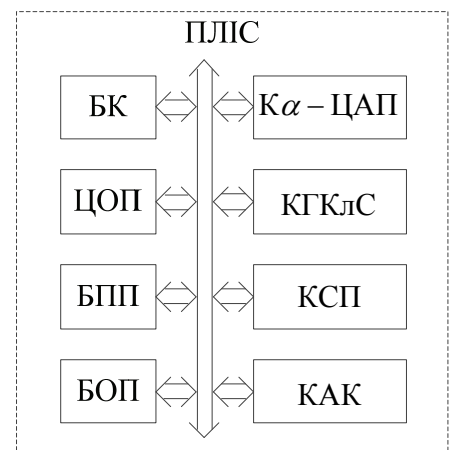


Рис. 9. Функціональна схема цифрової частини багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ВН, що самокалібруються, на базі ПЛІС

При цьому загальна функціональна схема багаторозрядного АЦП слідкувального типу з вагою надлишковістю, що самокалібрується, з урахуванням наданих рекомендацій, може мати вигляд, наведений на рис. 10.

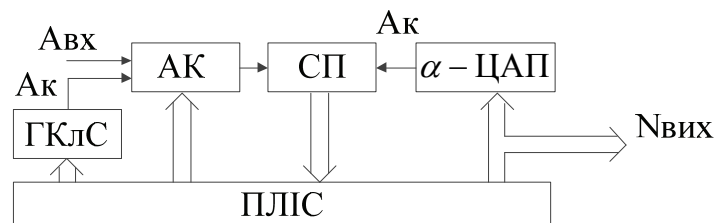


Рис. 10. Функціональна схема багаторозрядного АЦП слідкувального типу з вагою надлишковістю, що самокалібрується

Алгоритм функціонування такого АЦП наведено на рис. 11.

У рамках дослідження авторами також проведено фізичне моделювання запропонованих підходів.

На рис. 12 показано макет для моделювання багаторозрядного АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібрується.

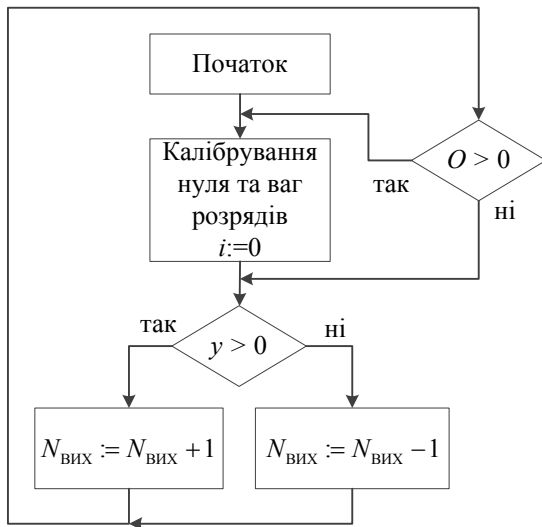


Рис. 11. Алгоритм роботи АЦП слідкувального типу, що самокалібрується: y — сигнал з виходу СП, O — ознака необхідності самокалібрування [15]

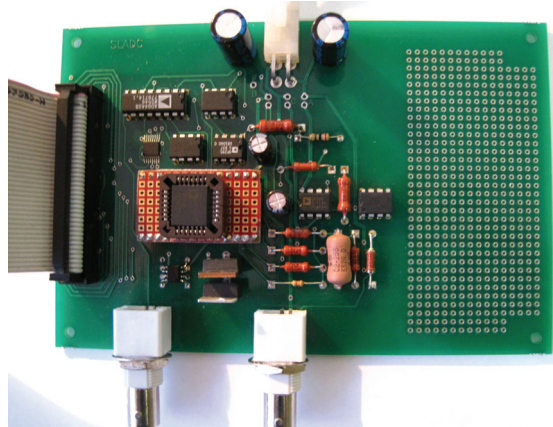


Рис. 12. Макет багаторозрядного АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібрується

Було спроектовано та реалізовано 18-ти розрядний АЦП слідкувального типу із ваговою надлишковістю, що самокалібрується (табл.).

Характеристики слідкувального АЦП із ВН, що самокалібрується

Назва	Величина
Діапазон вхідної напруги, В	± 5
Розрядність вихідного двійкового коду	12
Похибка перетворення (МЗР)	< 2
Тактова частота, кГц	250
Час калібрування, с	≈ 5

Варто зазначити, що у такому АЦП використовується метод одноциклового самокалібрування ЦАП із ВН в режимі із заданням індивідуального рівня калібрувального сигналу [16] та метод коригування характеристики перетворення АЦП на основі таблиці перетворення [10].

Тестування роботи розробленого макету здійснювалось з використанням високоточних генераторів та осцилографів, оригінального програмного забезпечення та пакету систем для збору та обробки даних LabVIEW.

Висновки

1. Проаналізовано підходи щодо структурно-функціональної організації багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються.

2. Проаналізовано підходи щодо проектування аналогової частини багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються. Запропоновано підхід щодо побудови ЦАП із ваговою надлишковістю на основі декількох ЦАП класичної двійкової системи числення.

3. Проаналізовано методи структурно-функціональної організації та підходи щодо проектування цифрової частини багаторозрядних АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються. Показано, що одним із перспективних підходів є використання програмованих логічних схем.

4. Проведено оцінку характеристик макетного зразка багаторозрядного АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібрується. Доведено, що застосування самокалібрування в такому АЦП, дає змогу забезпечити похибку перетворення пристрою на рівні одиниць молодших розрядів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Уолт Кестер. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер ; пер. с англ. Е. Б. Володина. — М. : Техносфера, 2007. — 1019 с.
2. Азаров О. Д. Статичні похибки генераторів компенсувального сигналу для АЦП слідкувального типу із ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. В. Дудник // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2012. — № 1(23). — С. 5—15.
3. DAC7731: 16-Bit, Single Channel, Digital-to-Analog Converter W/ Internal +10V Reference and Serial I/F [Електронний ресурс] / Texas Instruments (офіційний сайт). — Режим доступу : <http://www.ti.com/product/dac7731>.
4. DAC7664: Digital to Analog Converter, Quad, 16 Bit, 12uS Settling Time, +/- 1 LSB DNL [Електронний ресурс] / Texas Instruments (офіційний сайт). — Режим доступу : <http://www.ti.com/product/dac7664>.
5. AD8468: 16-Bit, fast comparator fabricated on XFCB2.0 [Електронний ресурс] / Analog Devices (офіційний сайт). — Режим доступу : http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8468.pdf.
6. Грушвицкий Р. И. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, Е. П. Угрюмов. — СПб. : БХВ-Петербург, 2002. — 608 с.
7. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення : моног. / О. Д. Азаров. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — 260 с.
8. Азаров О. Д. Генератори компенсувального сигналу для АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються / О. Д. Азаров, О. В. Дудник // Вісник вінницького політехнічного інституту. — 2011 — № 6. — С. 202—210. — ISSN 1997-9266.
9. Методи цифрового калібрування відмовостійких ЦАП із ваговою надлишковістю / [О. Д. Азаров, О. В. Кадук, О. В. Дудник, А. В. Росочук] // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2011 — № 1. — С. 4—14.
10. Азаров О. Д. Метод лінеаризації характеристики перетворення АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. В. Дудник, Д. О. Кириленко // Проблеми інформатизації та управління : зб. наук. пр. — 2011. — № 1. — С. 5—15.
11. Азаров О. Д. Методи побудови ЦАП із ваговою надлишковістю на базі двійкових ЦАП / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління : зб. наук. пр. — 2006. — № 3. — С. 5—11.
12. Азаров О. Д. Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов : моногр. / О. Д. Азаров, О. В. Кадук. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. — 150 с.
13. Грушвицкий Р. И. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, Е. П. Угрюмов. — СПб. : БХВ-Петербург, 2002. — 608 с.
14. Стешенко В. Б. ПЛИС фирмы ALTERA: проектирование устройств обработки сигналов / В. Б. Стешенко. — М. : ДОДЭКА, 2000. — 128 с.
15. Азаров О. Д. Оцінювання міжкалібрувального інтервалу для багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного перетворення із ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. В. Кадук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2009. — № 1(14). — С. 5—12.
16. Методи цифрового калібрування відмовостійких ЦАП із ваговою надлишковістю / [О. Д. Азаров, О. В. Кадук, О. В. Дудник, А. В. Росочук] // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія — Вінниця : ВНТУ, 2011 — № 1. — С. 4—14.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки

Стаття надійшла до редакції 13.03.2013
Рекомендована до друку 27.03.2013

Азаров Олексій Дмитрович — завідувач кафедри, *Дудник Олександр Вікторович* — аспірант, *Крупельницький Леонід Віталійович* — доцент.

Кафедра обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця