УДК 681.3:621.375

Азаров О. Д., д-р техн. наук,
Решетнік О. О.,
Гарнага В. А.,
Крупельницький Л. В., канд. техн. наук

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ЦАП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ НА БАЗІ ДВІЙКОВИХ ЦАП

Вінницький національний технічний університет

Запропоновано методи побудови надлишкових ЦАП на базі традиційних двійкових ЦАП. Показано, що існує елементна база для реалізації запропонованого підходу.
Проаналізовано запропоновані методи структурної побудови надлишкових ЦАП на базі традиційних не надлишкових двійкових ЦАП. Наведено та описано структурні схеми. Це дозволяє обирати метод побудови надлишкового ЦАП, спираючись на існуючу елементну базу, зокрема, на вироби багатьох компаній із виробництва електронних схем.
Запропоновано критерії оптимальності побудови надлишкового ЦАП, що дозволяє досягти максимальної ефективності використання вагової надлишковості при мінімальних додаткових витратах обладнання.

Вступ

Історично склалося так, що більшість сучасних ЦАП і АЦП реалізується на базі класичної двійкової системи числення [1, 2]. При цьому слід зауважити, що при побудові сучасних багаторозрядних ЦАП для спрощення технології виготовлення аналогових вузлів використовують структури у вигляді резистивних матриць у молодших розрядах і генераторів струмів у старших розрядах [3]. Водночас, принциповим недоліком використання двійкової системи числення в перетворювачах форми інформації (ПФІ) є те, що наявність у них інструментальних похибок призводить до появи в передатній характеристиці ЦАП зон, в яких вихідну аналогову величину не можна набрати жодною кодовою комбінацією. Такі зони називаються розривами передатної характеристики [1, 2, 4]. Це в свою чергу, призводить до виникнення в АЦП, побудованому на такому ЦАП, так званих пропусків кодів. Для уникнення цього явища треба використовувати ЦАП, який не має розривів передатної характеристики. У багаторозрядних ЦАП і АЦП на їх основі для досягнення нерозривності передатної характеристики, замість використання складної технології, традиційно використовують введення надлишковості: структурної, алгоритмічної та інформаційної [2]. Різновидом інформаційної надлишковості є вагова надлишковість, що має місце, зокрема, у надлишкових позиційних системах числення (НПСЧ) [5]. Відомо, що використання вагової надлишковості дає можливість комплексно вирішувати проблему збільшення точності порозрядних АЦП, побудованих на неточних елементах, шляхом цифрового самокалібрування передатної характеристики, а також підвищувати швидкодію порозрядних АЦП середньої швидкодії за рахунок можливості компенсації динамічних похибок першого і другого роду [5]. Причому, неточними вважаються аналогові елементи, первинні похибки яких перевищують підсумкову похибку перетворення (іноді досить істотно: на один, два порядки).

Актуальність

Слід відзначити, що використання вагової надлишковості є досить ефективним [5] для підвищення в комплексі точності та швидкодії АЦП і ЦАП. Водночас, побудова ЦАП на основі відомих НПСЧ вимагає створення оригінальної елементної бази. Тому, незважаючи на можливість використання при реалізації аналогових вузлів АЦП і ЦАП на основі НПСЧ спрощеної дешевої технології, масове виробництво останніх ускладнене через вказану обставину. Водночас, слід відзначити, що уведення вагової надлишковості може бути реалізовано не тільки на основі відомих НПСЧ [5 Азаров], а й з використанням традиційних двійкових ЦАП [6 Азаров-Решетнік]. Реалізація вказаного підходу може бути досить простою, оскільки відомі виробники електронних компонентів випускають моделі мікросхем, що містять в собі декілька двійкових ЦАП: *AD*5428, *AD*5433 та інші (*Analog Devices*) [3], DAC5652, DAC7558 (*Texas Instruments*) [7], *ISL*5927, *ISL*5929 (*Intesil*) [8]. Проте, вказаний підхід є новим і недостатньо дослідженим. Тому питання побудови ЦАП із ваговою надлишковістю на базі двійкових ЦАП для АЦП із підвищеною швидкодією і точністю, є досить актуальним.

Мета

Метою статті є аналіз запропонованих методів побудови надлишкових ЦАП на базі традиційних двійкових ЦАП.

Постановка задач

Згідно до мети задачами досліджень є:

1) аналіз методів структурної побудови надлишкових ЦАП на базі традиційних не надлишкових двійкових ЦАП;

2) оцінювання ефективності альтернативних варіантів надлишкових побудови ЦАП на базі двійкових ЦАП.

Розв`язання задач

Аналіз багатьох літературних джерел з основ цифрової обчислювальної техніки, починаючи з 60-х років 20-го століття і по теперішній час, зокрема, [9, 10, 11, 12, 13, 14], показує певні розбіжності у трактуванні такого поняття як основа системи числення α. На думку авторів найбільш вдалим є визначення цього поняття, наведене в [11]. У цьому випадку основа системи числення α розглядається як відношення ваг сусідніх розрядів. В АЦП із ваговою надлишковістю використовуються позиційні системи числення. Водночас, вказані системи числення доцільно поділити на два класи: а) із природним; б) зі штучним розташуванням ваг розрядів. До першого класу слід віднести такі, в яких будь-яке ціле число задається у вигляді:

$$A = \sum_{0}^{n-1} a_i \alpha^i ,$$

де $a_i \in \{0,1\},\{\bar{1},1\}$ – розрядний коефіцієнт, $i = 0, 1, 2, 3 \ldots n-1$ – номер розряду, α – основа системи числення, α^i – вага i-го розряду системи числення. Набір розрядних коефіцієнтів складає алфавіт системи числення.

До систем числення із природним розташуванням ваг розрядів належать класична двійкова з $a_i \in \{0,1\}$, $\alpha = 2.0$, десяткова, шістнадцяткова, а також НПСЧ на базі золотих s та p пропорцій [5]. У позиційних системах числення зі штучним розташуванням ваг розрядів будь-яке ціле число можна зобразити у вигляді:

$$A = \sum_{0}^{n-1} a_i Q_i ,$$

де $a_i \in \{0,1\},\{\bar{1},1\}$ – розрядний коефіцієнт, i – номер розряду системи числення, Q_i – вага i-го розряду, який входить до набору ваг розрядів або базису з множини $\{Q_0, Q_1, Q_2, ..., Q_{n-1}\}$. У системи числення зі штучним розташуванням ваг розрядів відношення ваг сусідніх розрядів є непостійним. Оскільки у цьому випадку основа α є змінною, то доцільно при виборі системи числення спиратися саме на базис. Співвідношення між вагами сусідніх розрядів $\{Q_0, Q_1, Q_2, ..., Q_{n-1}\}$ можуть задаватися в різний спосіб. Наприклад, у випадку використання p – чисел Фібоначі, вага наступного розряду визначається як сума ваг попередніх: $Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2}$. При цьому слід зауважити, що надлишкові ЦАП можуть бути побудовані як з використанням систем числення із природним, так зі штучним розташуванням ваг розрядів.

Автори пропонують методи побудови надлишкових ЦАП на базі двійкових ЦАП розділити на три:

1) ЦАП на базі двох однакових двійкових ЦАП із використанням суматора;

2) ЦАП на базі двох однакових двійкових ЦАП із використанням суматора і блока масштабування;

3) комбінований ЦАП на базі m однакових двійкових ЦАП з використанням суматора і блоків масштабування.

Розглянемо перший метод побудови надлишкових ЦАП на базі двох однакових двійкових ЦАП (рис. 1, *а*). Ваги розрядів таких ЦАП повинні бути пропорційні членам числових рядів, які можна отримати простим підсумовуванням членів двох двійкових рядів, що утворюють базис. Типовими представниками такого надлишкового ряду є: {1; 1; 2; 2; 4; 4; ... 512; 512; ...}. При цьому номери розрядів ЦАП1 можна вважати парними, а ЦАП2 непарними. Розряди ЦАП вставляються поруч один з одним за методом гребінки (рис. 1, *б*)) [6].

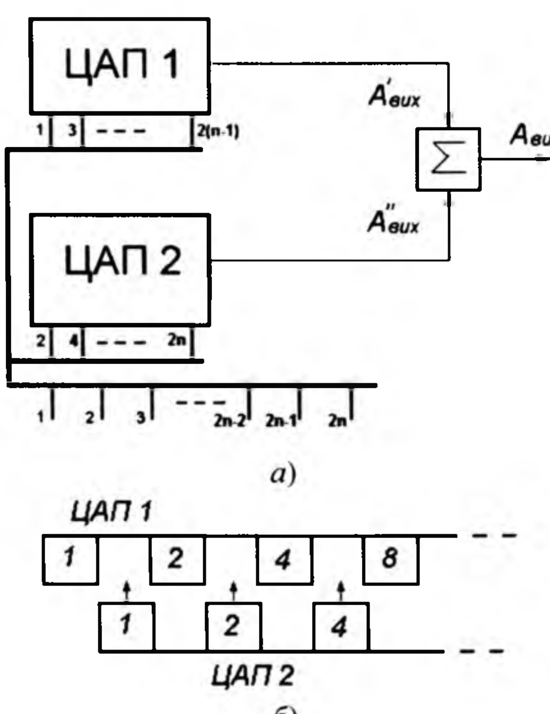

Рис. 1. Побудова надлишкових ЦАП за першим методом: *а*) на базі двох однакових двійкових ЦАП з використанням суматора; *б*) розташування розрядів ЦАП за методом гребінки

Другим методом побудови є ЦАП із ваговою надлишковістю на базі двох двійкових з використанням суматора і блока масштабування (рис. 2). При цьому до виходу ЦАП2 підключається масштабний блок. Розглянемо приклад надлишкового ЦАП, ваги розрядів якого пропорційні двійковопохідному ряду на основі двох двійкових рядів з коефіцієнтом 1,5. З урахуванням масштабного коефіцієнта отримуємо такі ряди:

{1; 2; 4; 8; 16; 32; 64, ...},

{1,5; 3; 6; 12; 24; 48; 96, ...}.

Далі розташовуємо члени рядів методом гребінки:

{1; 1,5; 2; 3; 4; 6; 8; 12; 16; 24; 32; 48; 64; 96, ...}.

Технічна реалізація ЦАП на основі запропонованих рядів є досить простою. Відповідно до структурної схеми вихід другого ЦАП під'єднується до суматора аналогових сигналів через масштабний блок із коефіцієнтом передачі M. Слід зазначити, що у випадку застосування двох струмових ЦАП, виходи можуть об`єднуватися, монтажно і при цьому фізична потреба у суматорі відпадає.

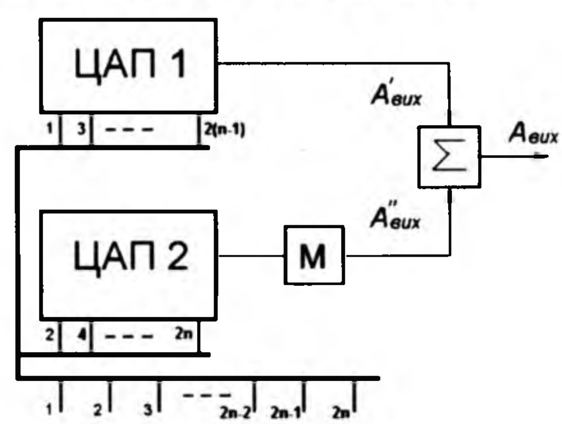

Рис. 2. Надлишковий ЦАП із використанням суматора і блока масштабування

Схемотехнічна реалізація масштабного блоку і суматора залежить від принципу побудови ЦАП, зокрема у вигляді перетворювачів код-струм, код-напруга. Окремий напрямок утворюють конденсаторні ЦАП із виходом по напрузі. Варіанти схемотехнічного підключення ЦАП до суматора і масштабного блока (в комплексі) наведено на рис. 3.

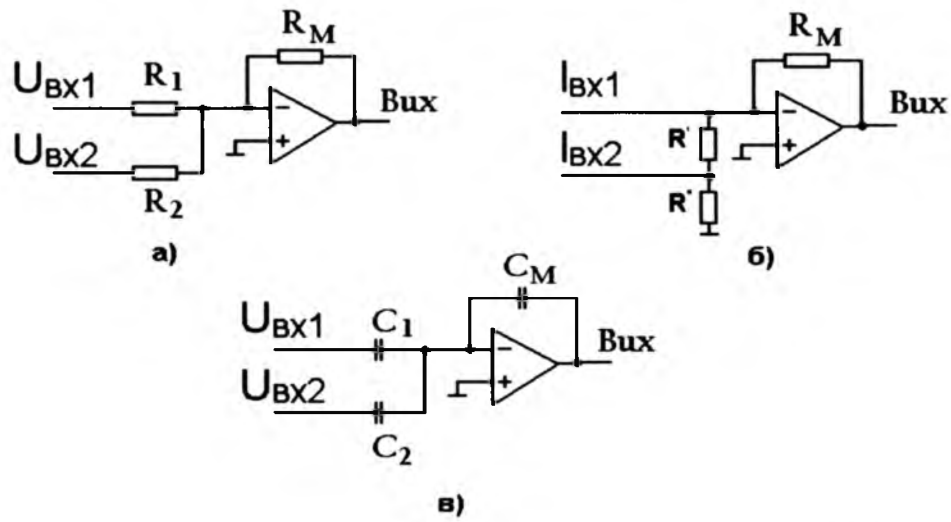

Рис. 3. Схемотехнічна реалізація масштабного блоку і суматора для: *а*) ЦАП з виходом по напрузі; *б*) ЦАП з виходом по струму; *в*) конденсаторного ЦАП

Тут варіант *б*) передбачає використання резистивного дільника на резисторах *R*' і *R*''. Зручними з точки зору реалізації ПФІ з регулярною структурою є застосування НПСЧ з постійним відношенням між вагами сусідніх розрядів [5, 6]. Окремим прикладом може слугувати масштабний коефіцієнт $\alpha = \sqrt{2} \approx 1.41$. При цьому ЦАП має ваги розрядів дорівнюють:

$\{1;\ \sqrt{2};\ 2;\ 2\sqrt{2};\ 4;\ 4\sqrt{2};\ \ldots\ 16;\ 16\sqrt{2};\ \ldots 512;\ 512\sqrt{2};\}$.

Третім методом побудови надлишкового ЦАП є використання декількох урізаних двійкових ЦАП, суматора і декількох масштабних блоків. При цьому можна розрахувати масштабні коефіцієнти, що також дозволяють побудувати надлишковий ЦАП із постійним відношенням між вагами сусідніх розрядів (рис. 4). Ряди, що при цьому використовуються, мають основу $\alpha = 2^{\frac{b}{m}}$. Число m задає кількість модифікованих двійкових рядів, які використовуються для формування підсумкового надлишкового ряду, b визначає порядок використання базових рядів. При $b = 1$ використовуються всі члени базових рядів $\{1;\ 2;\ 4;\ 8;\ \ldots\ 2^{n-1}\}$. При $b = 2$ використовуються кожен другий член базового ряду $\{1;\ 4;\ 16;\ 64;\ \ldots\ 2^{2(n-1)}\}$. При довільному b використовуються кожен b- й член базового ряду $\{1;\ 2^b;\ 2^{2b};\ 2^{3b};\ \ldots\ 2^{(n-1)b}\}$. Значення членів базових двійкових рядах визначаються як $2^{\frac{b}{m}(k-1)}$, де k – номер базового ряду у загальному випадку. Отримуємо такі члени:

$$\{1,\ 2^{\frac{b}{m}},\ 2^{\frac{b}{m}2},\ 2^{\frac{b}{m}3},\ \ldots\ 2^{\frac{b}{m}(m-1)}\}.$$

Якщо $\alpha = 2^{\frac{b}{m}}$ то, маємо ряд:

$$\{1; 2^{\frac{b}{m}}; \ldots 2^{\frac{b}{m}(m-1)}; \ldots; 2^b; 2^b\, 2^{\frac{b}{m}}; \ldots\ 2^b\, 2^{\frac{b}{m}(m-1)}; \ldots; 2^{(n-1)b}; \ldots 2^{(n-1)b}\, 2^{\frac{b}{m}(m-1)}\}.$$

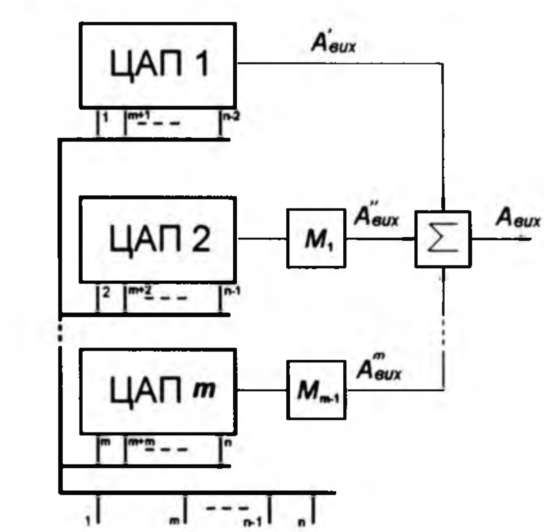

Рис. 4. Комбінований ЦАП на базі *m* урізаних двійкових ЦАП, масштабатора і суматора

У таблиці 1 наведено числові послідовності, які можна отримати, зокрема, на базі двох, трьох та чотирьох двійково-похідних базових рядів.

Таблиця 1

Основа	Ряд
$2^{\frac{1}{2}} = 1.414$	{1; 1,414; 2; 2,828; 4; 5,656; 8; 11,312}
$2^{\frac{1}{3}} = 1.259$	{1; 1,259; 1,585; 2; 2,518; 3,17; 4}
$2^{\frac{2}{3}} = 1.587$	{1; 1,587; 2,519; 4; 6,348; 10,074; 16}
$2^{\frac{1}{4}} = 1.189$	{1; 1,189; 1,414; 1,689; 2; 2,378; 2,828; 3,378; 4}
$2^{\frac{3}{4}} = 1.681$	{1; 1,681; 2,826; 4,750; 8; 13,448; 22,608; 38,072; 64}

ЦАП на базі рядів з основою $2^{\frac{b}{m}}$ будуються так, як і ЦАП з масштабними коефіцієнтами. Перевагою рядів з основою $2^{\frac{b}{m}}$ є стале відношення між судніми членами. Недоліком є обмежена кількість отриманих значень основи α та необхідність використання декількох урізаних двійкових ЦАП та масштабних блоків із різними масштабними коефіцієнтами (від точності завдання яких залежить постійність співвідношення між вагами сусідніх розрядів ЦАП. Водночас, оскільки коефіцієнти є степенями одного числа, то масштабні блоки можуть об`єднуватися послідовно для отримання потрібного коефіцієнта).

Варто зазначити, що масштабні коефіцієнти можуть бути менші за одиницю. Тоді сформований ряд не буде монотонно зростаючим. Є можливість штучно переставляти члени ряду для формування довільного порядку їх розташування: 1; 2; 4; 3; 8; 16; 12; 32; 64. Це дозволяє змінювати характеристики ряду, зберігаючи діапазон представлення чисел та рівень надлишковості обладнання.

Передатна характеристика надлишкового ЦАП, побудованого на неточних елементах (рис. 5) має зони перекриття і не має розривів, за умови, що рівень похибки не перевищує рівень вагової надлишковості, що на практиці реалізувати досить просто. Тут A – аналогова величина, а N – код на вході ЦАП.

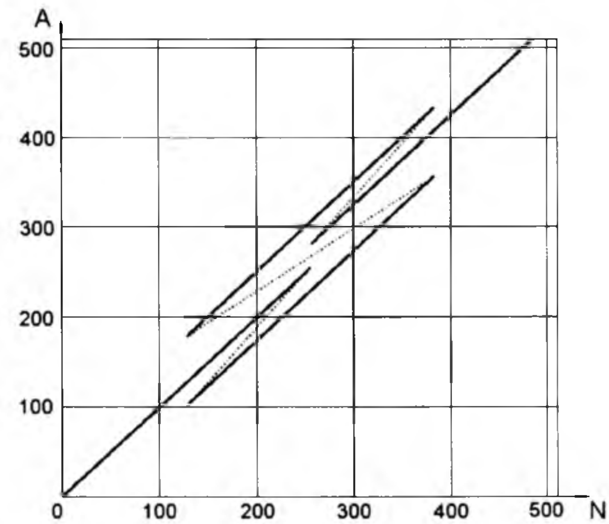

Рис. 5. Передатна характеристика ЦАП

При цьому вагова надлишковість для будь-якого i-го розряду визначається як:

$$\Delta Q_i = \sum_{0}^{i-1} Q_j - Q_i ,$$

а при цьому відносна вагова надлишковість – як:

$$\delta Q_i = \frac{\sum_{0}^{i-1} Q_j - Q_i}{\sum_{0}^{i} Q_j} .$$

Оскільки вказані числові ряди є надлишковими, то для остаточного прийняття рішення про вибір якогось з них треба оцінити їх ефективність. При цьому виходимо з таких міркувань: порівняно з двійковою в надлишковій системі числення подовжується розрядна сітка [5]. Для рядів із постійним відношенням між сусідніми членами ступінь подовження визначається коефіцієнтом подовження:

$$\gamma_n = \frac{\ln 2}{\ln \alpha}.$$

Якщо ж відношення між сусідніми членами ряду не є сталим, то коефіцієнт подовження розрядної сітки можна визначити як відношення відповідної кількості надлишкових розрядів до кількості двійкових розрядів за умови рівності діапазонів зображення чисел [5].

Значення ефективності можна оцінити через питому вагову надлишковість, яка враховує збільшення кількості обладнання, тобто відношення рівня вагової надлишковості до коефіцієнту подовження розрядної сітки:

$$E = \frac{\delta Q}{\gamma_n}.$$

Залежність відносної вагової надлишковості, коефіцієнту подовження розрядної сітки та питомої вагової надлишковості від основи системи числення α наведено на рис. 6. Причому криву коефіцієнту розрядної сітки нормовано по 0,1 по осі абсцис, тобто значення на графіку 0,2 відповідає коефіцієнту 2.

У таблиці 2 наведено дані для вказаних залежностей.

У таблиці використовуються такі позначення сформованих рядів: I – за першим методом; II – за другим методом з M=1,5; III – за другим методом з M=$\sqrt{2}$; IV – за третім методом;V – НПСЧ з основою $\alpha = 1.618$; VI – НПСЧ з основою $\alpha = 1.5$;.Аналіз даних, наведених у таблиці показує, що найкраще значення ефективності використання вагової надлишковості E=0,206 для надлишкового ряду ваг розрядів з постійною основою $\alpha = \sqrt{2}$ (III). Для інших варіантів значення E є меншими.

Таблиця 2

Різновиди рядів	I	II	III	IV	V	VI
δQ	0,33	0,398	0,412	0,199	0,236	0,333
γ_n	2,00	2,00	2,00	2,00	1,441	1,71
E	0,165	0,199	0,206	0,099	0,164	0,195

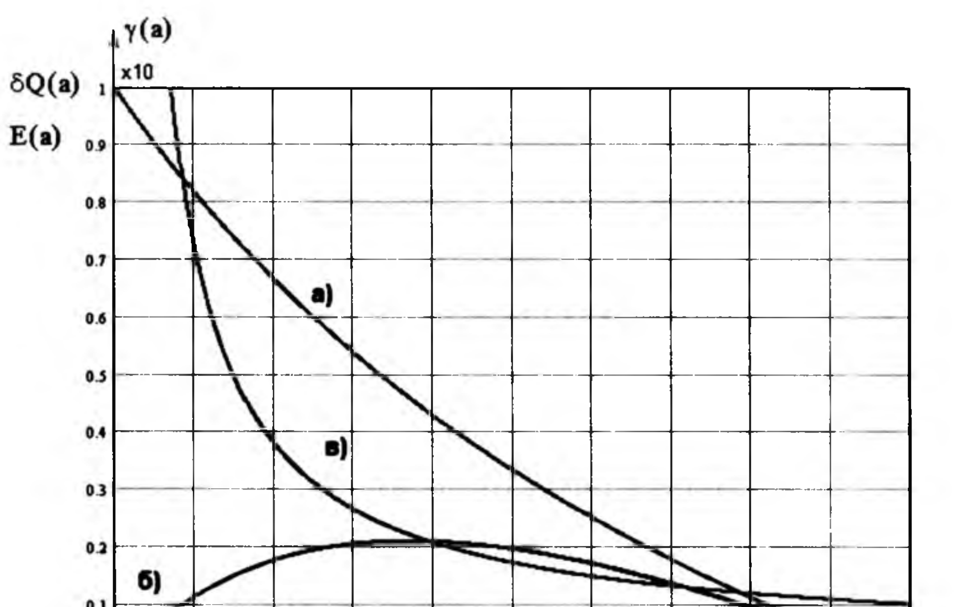

Рис. 6. Функціональні залежності: а) $\delta Q(\alpha)$, б) $E(\alpha)$, в) $\gamma_n(\alpha)$

Висновки

1. Здійснений аналіз методів побудови ЦАП із ваговою надлишковістю на базі двійкових ЦАП, дозволяє обирати метод побудови надлишкового ЦАП, спираючися на існуючу елементну базу, зокрема, на вироби багатьох компаній із виробництва електронних схем.

2. Запропоновано критерії оптимальності побудови надлишкового ЦАП, що дозволяє досягти максимальної ефективності використання вагової надлишковості при мінімальних додаткових витратах обладнання.

3. Оцінено ефективність альтернативних методів побудови надлишкових ЦАП на базі двійкових ЦАП. Показано, що найкращим варіантом є побудова ЦАП на базі системи числення з основою $\alpha = \sqrt{2}$, тобто за допомогою другого методу.

Список літератури

1. *Гельман М. М.* Системные ЦАП и процессоры сигналов. – М.: Мир, 1999. – 559 с.

2. *Микроэлектронные* цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации. / Под ред. В.Б. Смолова. – Л.: Энергия, 1976. – 336 с.: ил.

3. *Analog* Devices inc. Dual, 12-/14-/16-bit, 1.0 GSPS D/A Converter AD9776/AD9778/AD9779. One Technology Way, P.O. Box, 9106, Norwood, MA 02062-9106, USA. 2005. – 56 p.

4. *Полупроводниковые* кодирующие и декодирующие преобразователи / Под ред. В. Б. Смолова и Е. А. Смирнова. – Л.: Энергия, 1967. – 312 с.: ил.

5. *Азаров О. Д., Решетнік О. О., Захарченко С. М., Лукащук О. О., Харьков О. М.* Формування нерозривних передатних характеристик ЦАП і АЦП на основі вагової надлишковості // Інформаційні технології та комп`ютерна інженерія. – 2006.– N3(7). – С. 7–15 с.

6. *Burn*-Brown Products from Texas Instruments. Dual, 12-Bit, Parallel Input, Multiplying Digital-to-Analog Converter. Dallas, Texas Instruments Incorporated. 2006. – 18 p.

7. *Intersil* American Inc. ISL5961 14-Bit, +3.3V, 130/210+MSPS, High Speed D/A Converter. Intersil American Inc. 2004. – 13 p.

8. *Бабич М. П., Жуков І. А.* Комп'ютерна схемотехніка: Навч. посібник. – К.: МК-Прес, 2004. – 412 с.

9. *Савельев А. Я.* Прикладная теория цифровых автоматов: Учеб. для вузов по спец. ЭВМ. – М.: Высш. шк., 1987. – 272 с.: ил.

10. *Папернов А. А.* Логические основы цифровой вычислительной техники. Изд. 3-е, переработанное и дополненное. Учебное пособие для вузов. – М.: Советское радио, 1972. – 592 с.

11. *Бузунов Ю. А., Вавилов Е. Н.* Принципы построения цифровых вычислительных машин. – М.: Техника, 1972. – 316 с.

12. *Карцев М. А.* Арифметика цифровых машин. – М.: Наука, 1969. – 576 с.: ил.

13. *Геллер С. И., Остроумов М. А., Парамонов В. С.* и др. Основы вычислительной техники. – М.: Артиллерийская академия Советской Армии, 1960. – 414 с.