

ГЕНЕРАТОРИ ОДНАКОВИХ РОЗРЯДНИХ СТРУМІВ ІЗ ВИСОКИМИ ВИХІДНИМИ ОПОРАМИ ДЛЯ ЦАП

Азаров Олексій, Обертюх Максим

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація

У статті наведено принципи побудови генераторів однакових струмів із високими вихідними опорами для використання у багаторозрядних ЦАП. Розглянуто підходи щодо побудови генераторів однакових струмів для багаторозрядних ЦАП з первинними генераторами струмів, підключеними до вихідних каскадів за допомогою струмових дзеркал.

Abstract

The article discusses the principles of construction of generators of the identical currents with high output resistances for use in multi-bit DACs. Approaches to the construction of generators of the identical currents for multi-bit DACs with primary current generators connected to the output stages by means of current mirrors are considered.

Одним з основних способів реалізації цифро-аналогових перетворювачів є побудова їх на базі резистивних матричних дільників. Останні можуть виступати як дільники напруги або використовуватися для формування зважених струмів, що потім підсумовуються [1, 2]. Також можливо при використанні драбинкових резистивних матриць подавати однакові струми в різні вузли матриць з отриманням вихідного сигналу у вигляді струму або напруги [1, 2]. Авторами розглянуті схемні методи побудови генераторів однакових струмів з високим вихідним опором для багаторозрядних ЦАП із первинними генераторами струмів, підключеними до вихідних каскадів за допомогою струмових дзеркал, які дозволять підвищити точність і розрядність останніх.

Високим вихідним опором генератора струму на біполярних транзисторах будемо вважати таке його значення, що задовольняє умові $r_{ВИХ} \gg r_k$, де r_k - вихідний диференціальний опір транзистора в схемі з ЗБ. Базова схема багаторозрядного ЦАП із використанням генераторів однакових струмів, узагальнена на випадок використання у вхідному цифровому коді надлишкової системи числення з основою α представлена на рисунку 1 [3].

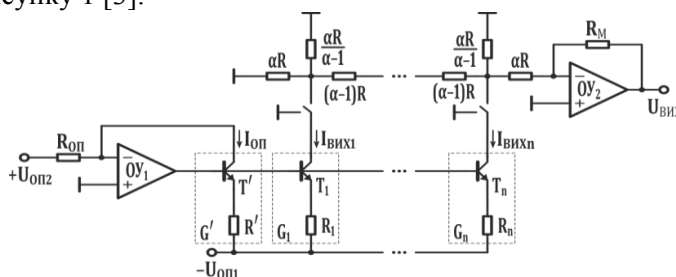


Рисунок 1 – Базова схема ЦАП з ваговою надлишковістю з генераторами однакових струмів і матрицею драбинкового типу.

Схема включає в себе $n + 1$ генераторів струмів G' , G_1, \dots, G_n , де n – число розрядів ЦАП. Виходи генераторів G_1, \dots, G_n за допомогою керованих цифровим кодом ключів підключаються або до землі, або до вузлів резистивної решітки типу $R-\alpha R(R-2R)$, сумарний вихідний сигнал

формується на виході операційного підсилювача OY_2 . Вихідний струм генератора G' примусово задається за допомогою OY_1 , і оскільки $R' = R_1 = \dots = R_n$, то $I_{ВИХ1} = \dots = I_{ВИХn} = I'_{ВИХ}$. Недоліком подібних найпростіших генераторів струмів є їх низький вихідний опір, тому що в процесі роботи ЦАП потенціали в вузлах резистивної решітки і відповідно напруги на колекторах T_1, \dots, T_n будуть змінюватися, внаслідок чого будуть змінюватися вихідні струми генераторів і з'являтися похибка ваг розрядів, що

порушує принцип суперпозиції й обмежує точність ЦАП. Вихідний опір $r_{ВИХ}$ вищеприписаного найпростішого генератора струму можна вивести з таких співвідношень:

$$di = \frac{du}{r_k} + \frac{h_{12} \cdot du}{R_i}, \quad h_{12} = \frac{r_e}{r_k} \cdot \beta \Rightarrow r_{вих} = \frac{du}{di} = \frac{R_i \cdot r_k}{R_i + r_k \cdot h_{12}} = r_k \left/ \left(1 + \frac{r_e \cdot \beta}{R_i} \right) \right.,$$

де du, di – прирости вихідного струму і напруги, h_{12} - коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі транзистора в схемі із ЗБ, r_k, r_e - вихідний і вхідний диференціальний опір транзистора в схемі з ЗБ. Якщо прийняти $I_i = 1\text{мА}$, $R_i = 1,2\text{кОм}$ і використовувати параметри моделі інтегрального транзистора NUHFARRY [4], то $r_{ВИХ} \approx 0,355 \cdot r_k = 1,78\text{МОм}$.

Для збільшення вихідного опору генераторів однакових розрядних струмів пропонуються варіанти їх побудови, показані на рисунку 2. Розглянемо тільки схеми власне генераторів струмів для ЦАП. Схему генераторів струмів з додатковим генератором струмів зміщення наведено на рисунку 2а.

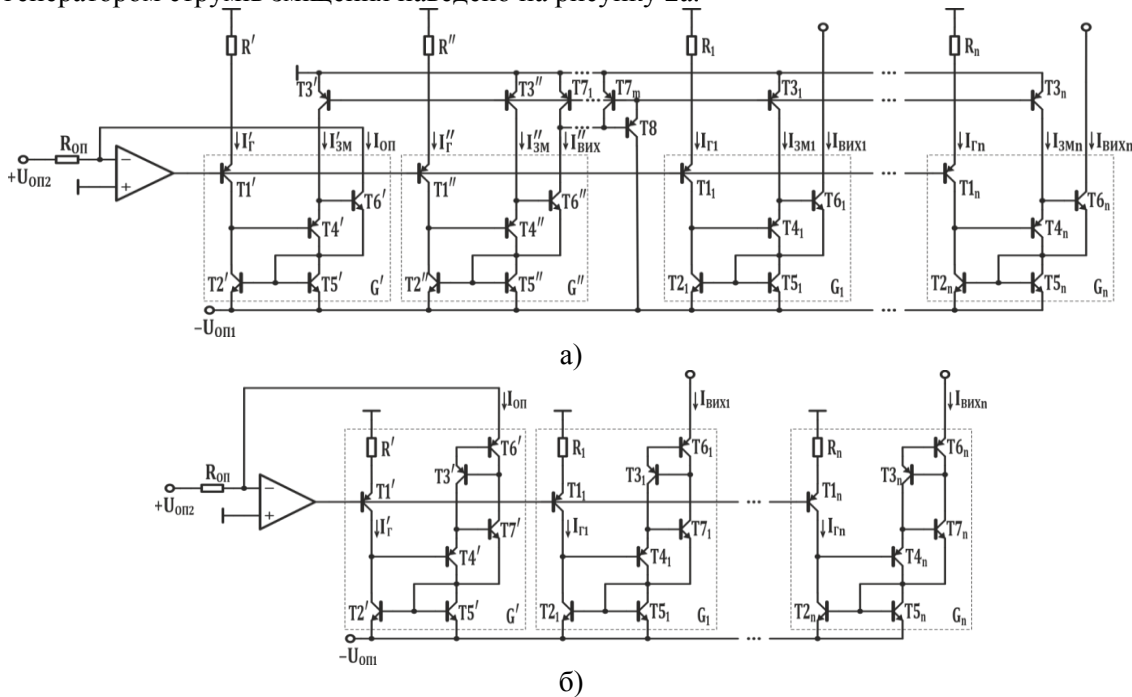


Рисунок 2 – Схеми генераторів однакових струмів: а) з додатковим генератором струмів зміщення; б) з автозміщенням.

Схема включає в себе $n + 2$ генераторів струмів G', G'', G_1, \dots, G_n . Розрядні струми формуються на виходах генераторів G_1, \dots, G_n . За допомогою примусового завдання вихідного струму генератора G' ($I_{оп} = U_{опн} / R_{оп}$) формується напруга на базі $T1'$ і відповідно базисах $T1_i$ на виходах інших генераторів G_i також задаються струми $I_{ВИХi} = I_{оп}$. Генератор G'' і струмове дзеркало на транзисторах $T3_i, T7_1 \dots T7_m, T8$, формує струми зміщення I_{3Mi} , які поступають в емітери $T4_i$. $I_{3Mi} = I''_{ВИХ} / m$, де m - число транзисторів $T7$. Транзистори $T1_i$ і резистори R_i утворюють первинні генератори аналогічно схемі на рисунку 1 з вихідними струмами $I_{Гi}$. Дані струми підключаються до вихідних каскадів генераторів через струмові дзеркала на транзисторах $T2_i$ і $T5_i$. З огляду на те, що $I_{E(T5)} = I_{E(T2)} + I_{A3}$, де I_{A3} - струм асиметрії дзеркала (за рахунок того, що напруги БК $T2$ і $T5$ нерівні) $I_{E(T2)} = I_{Г} + I_{B(T4)} + I_{B(T2)}$ можна записати:

$$I_{ВИХ} = I_{B(T4)} - I_{3M} + I_{B(T2)} + I_{Г} + I_{B(T4)} + I_{B(T2)} + I_{A3}$$

$$\Delta I_{ВИХ} = 2 \cdot \Delta I_{B(T4)} + \Delta I_{Г} - \Delta I_{3M} + \Delta I_{A3}. \quad (1)$$

При цьому джерелами похибок будуть збільшення струму бази транзистора $T4$, збільшення напруги на переході БЕ $T4$ і як наслідок зменшення напруги на переході БК $T3$ і зменшення струму I_{3M} , зменшення напруги на переході БЕ $T6$ і як наслідок

зменшення напруги на переході БК Т4 і збільшення $I_{B(T4)}$, збільшення напруги на переході БК Т1 і збільшення $I_{K(T1)}$, зменшення напруги на переході БК Т2 і збільшення I_{A3} . В результаті вираз (1) можна переписати у вигляді:

$$di = \frac{2}{\beta_{(T4)}} \cdot \left(\frac{du}{r_{k(T6)}} + \frac{du}{r_{k(T6)} \cdot \beta_{(T6)}} \right) - \frac{1}{r_{k(T3)}^*} \cdot \left(r_{e(T6)} \cdot \frac{du}{r_{k(T6)}} + h_{12(T6)} \cdot du \right) + \left(\frac{1}{r_{k(T2)}^*} + \frac{1}{r_{k(T1)}} + \frac{2}{r_{k(T4)}} \right) \cdot \left((r_{e(T4)} + r_{e(T6)}) \cdot \frac{du}{r_{k(T6)}} + h_{12(T6)} \cdot du \right),$$

$$r_{вих} = \frac{du}{di} \approx \frac{\beta_2 \cdot r_{k1}}{2 - r_e \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{\beta_2}{m \cdot r_{k2}} - \beta_1 \cdot \frac{m+1}{m \cdot r_{k1}} \right)}$$

де r_{k1}^* , r_{k2}^* - вихідний диференційний опір npr і pnp транзисторів у схемі із ЗЕ, r_{k1} , r_{k2} - вихідний диференційний опір npr і pnp транзисторів у схемі із ЗБ, β_1 і β_2 - коефіцієнти підсилення базового струму npr і pnp транзисторів. Якщо прийняти $I_i = 1\text{мА}$, $R_i = 1,2\text{кОм}$ і використовувати параметри моделі транзисторів NUHFARRY і PUNFARRY [4], то $r_{ВИХ} \approx 68,0\text{МОм}$. Водночас моделювання цієї схеми в програмі MicroCap 11 з використанням тих же моделей транзисторів дає значення $r_{ВИХ} \approx 65,9\text{МОм}$. Відповідно до формули (2) досяжна розрядність ЦАП – $n \approx 18$.

Іншим варіантом подібної схеми генераторів струмів, наведеним на рисунку 2б, є схема з автозміщенням. У ній відсутній генератор G" і струмове дзеркало, які слугували для формування струмів зміщення. Вихідний струм генератора ($I_{ВИХ}$) - струм емітера транзистора Т6, зміна напруги на виході генератора буде дорівнює зміні напруг на переходах БК Т3 і Т7. Струм зміщення $I_{ЗМ}$, що надходить в емітер Т4 формується за допомогою транзисторів Т3 і Т6 і дорівнює $I_{ЗМ} = I_{K(T3)} - I_{B(T7)} \approx I_{ВИХ} \cdot (1/\beta_{T6} - 1/\beta_{T7})$. Вираз (1) набуде вигляду:

$$I_{ВИХ} = I_{B(T4)} + I_{B(T2)} + I_{\Gamma} + I_{B(T4)} + I_{B(T2)} + I_{A3}$$

$$\Delta I_{ВИХ} = 2 \cdot \Delta I_{B(T4)} + \Delta I_{\Gamma} + \Delta I_{A3}, \quad (2)$$

і джерелами похибок будуть збільшення струму бази транзистора Т4, збільшення напруги на переході БЕ Т4, зменшення напруги на переході БЕ Т7 і як наслідок п.2 і п.3 зменшення напруги на переході БК Т4 і збільшення $I_{B(T4)}$, збільшення напруги на переході БК Т1 і збільшення $I_{K(T1)}$, зменшення напруги на переході БК Т2 і збільшення I_{A3} . В результаті вираз (2) можна переписати у вигляді:

$$di = \frac{2}{\beta_{(T4)}} \cdot \left(\frac{du}{r_{k(T7)}} + \frac{du}{r_{k(T3)}} + \frac{du}{r_{k(T7)} \cdot \beta_{(T7)}} \right) + \left(\frac{1}{r_{k(T2)}^*} + \frac{1}{r_{k(T1)}} + \frac{2}{r_{k(T4)}} \right) \cdot \left((r_{e(T4)} + r_{e(T7)}) \cdot \left(\frac{du}{r_{k(T7)}} + \frac{du}{r_{k(T3)}} \right) + h_{12(T7)} \cdot du \right).$$

$$r_{вих} = \frac{du}{di} \approx \frac{\beta_2 \cdot r_{k1}}{2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta_2} \cdot \frac{r_{k1}}{r_{k2}} \right) + r_e \cdot \frac{\beta_2 \cdot \beta_1^3}{\beta_1 - \beta_2} \cdot \frac{1}{r_{k1}}}$$

Якщо прийняти $I_i = 1\text{мА}$, $R_i = 1,2\text{кОм}$ і використовувати параметри моделі транзисторів NUHFARRY і PUNFARRY [4], то $r_{ВИХ} \approx 39,62\text{МОм}$, моделювання цієї схеми в програмі MicroCap 11 з використанням тих же моделей транзисторів дає значення $r_{ВИХ} \approx 39,44\text{МОм}$. Відповідно до формули (2) у цьому випадку досяжна розрядність ЦАП $n \approx 18$.

Авторами проаналізовано запропоновані способи побудови генераторів однакових струмів для багаторозрядних ЦАП з первинними генераторами струмів, підключеними до вихідних каскадів за допомогою струмових дзеркал. Показано, що вихідні опори генераторів сягають значень 40-70МОм. Досяжна розрядність ЦАП при використанні цих генераторів становить 18 розрядів.

Список використаних джерел

1. Никамин В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Справочник. – СПб.: КОРОНА принт; М.: «Альтекс-А», 2003. – 224 с., ил.
2. Аналого-цифровое преобразование / Под ред.. Уолта Кеслера. Москва: Техносфера, 2007. – 1016 с.
3. Азаров О.Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю: монографія / Азаров О. Д.. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 231 с.
4. Intersil Corporation™, NFA3046/3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models. Режим доступу: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/mm30/mm3046.pdf>