

Метод зменшення глітчів у ЦАП із ваговою надлишковістю

Азаров О.Д., Муращенко О.Г.
кафедра обчислювальної техніки,
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
oleksandr.murashchenko@gmail.com

Method of glitch reduction In DAC with weight redundancy

O. Azarov, O. Murashchenko
Department of Computer Technique
Vinnitsa National Technical University
oleksandr.murashchenko@gmail.com

Анотація—Досліджено можливість використання надлишкових позиційних систем числення з метою зменшення глітчів в ЦАП. Доведено можливість застосування систем числення як з дробовими, так і з цілочисловими вагами розрядів. Запропоновано алгоритм зменшення глітчів в режимі генерування неперервного аналогового сигналу ЦАП. Оцінено ефективність застосування вагової надлишковості для зменшення рівня глітчів та запропоновано оптимальні параметри систем числення. Наведено структурну схему низькоглітчевого ЦАП на основі кодів Фібоначчі. Результати моделювання доводять доцільність застосування вагової надлишковості і показують значне зменшення глітчів в ЦАП порівняно з класичною двійковою системою числення.

Abstract— There had been researched the possibility of using the redundant positional number system in order to reduce glitches in DAC. There had been described the usage pattern of number systems with fractional digit weights of bits as well as with the whole number weights of bits. Hereafter there had been suggested the algorithm for glitches reduction in the DAC generation mode of incessant analogue signal. There had also been estimated the efficiency of weight redundancy application with further presentation of the most efficient parameters of number systems. The paper describes a block diagram of a low-glitch DAC based on Fibonacci codes. The simulation results prove the feasibility of weight redundancy application and show a significant reduction of glitches in DAC in comparison with the classical binary system.

Ключові слова— глітчів в ЦАП, вагова надлишковість, коди Фібоначчі

Keywords— glitches in DAC, weight redundancy, Fibonacci codes

І. ВСТУП

Цифроаналогові перетворювачі (ЦАП) є невід'ємною складовою пристроїв прямого

цифрового синтезу (DDS) [1]. Причому саме ЦАП у кінцевому випадку визначає точність формування вихідного аналогового сигналу. Слід також відзначити, що переважна більшість наукових статей у цьому плані присвячена опису принципів синтезу аналогового сигналу по дискретних відліках та реалізації цифрової частини систем. Водночас аналіз статичних і динамічних характеристик ЦАП розглядається недостатньо. Це безумовно призведе до спрощеного сприйняття можливостей пристроїв DDS і необґрунтованого завищення досяжних параметрів вихідного сигналу. Окремим негативним чинником при цьому є так звані глітчів.

Глітчів – це короточасні паразитні викиди вихідного сигналу $A_{\text{вих}}$, що виникають під час зміни вхідного коду ЦАП. Вплив цих викидів на форму сигналу істотно посилюється за умови збільшення частоти зміни коду $k_{\text{вх}}$.

В науковій літературі описано існуючі підходи до зменшення глітчів в ЦАП, а саме: застосування цифрового калібрування до початку основної роботи ЦАП [2], використання додаткового обладнання, як пристрою вибірки-зберігання або аналогової лінії затримки [4] та використання так званих унарних ЦАП [5]. Проте зазначені методи мають ряд недоліків, що призводять до значного зменшення швидкодії ЦАП, збільшення похибки перетворення та суттєвого збільшення апаратних витрат. Крім того опубліковані деякі інші підходи до зменшення глітчів в ЦАП, наприклад метод динамічної компенсації глітчів, які виникають внаслідок асиметрії зростання/спадання [6] та деякі інші. При цьому слід зазначити недоліки вказаних методів: вони є алгоритмічно складними, оскільки вимагають складної апаратної реалізації; враховується лише одна складова глітчів, що є

недостатнім для ефективного зменшення рівня глітчів у реальних ЦАП; не враховується розбалансування схеми під час зміни умов експлуатації.

На думку авторів для зменшення глітчів дієвим є застосування в ЦАП вагової надлишковості. Цей метод не залежить від конкретних параметрів обладнання та навколишнього середовища, а також не вимагає використання значної кількості додаткового обладнання.

Дослідженню цього підходу присвячено деякі сучасні оригінальні розробки [5], однак в них є значні недоліки, зокрема істотний зсув нуля на виході схеми при нульовому вхідному коді $K_{вх}$, що вимагає введення у схему додаткового обладнання для компенсації цього зсуву, що у свою чергу є нетривіальною задачею і може призвести до значних ускладнень, що пов'язані з точністю, швидкодією і т. ін..

II. МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ ГЛІТЧІВ У ЦАП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Запропонований метод передбачає побудову цифроаналогового перетворювача на основі систем числення з ваговою надлишковістю, зокрема, на основі r -кодів Фібоначчі, а також перетворювача число-імпульсного коду в паралельний за допомогою лічильника Фібоначчі.

Суть методу полягає у використанні в процесі цифроаналогового перетворення вагової надлишковості, що дозволяє зменшити перепади значень аналогової величини під час зміни вхідного коду $K_{вх}$. Причому, чим більшим є рівень цієї надлишковості, тим меншим є цей перепад у відносних одиницях.

Узагальнену структурну схему синтезатора монотонно зростаючого аналогового сигналу на основі Фібоначчієвого ЦАП зображено на рис. 1. Вона містить: генератор тактових імпульсів, блок керування, дільник частоти, Фібоначчієвий лічильник, Фібоначчієвий цифроаналоговий перетворювач (ЦАП) та фільтр низьких частот (ФНЧ).

Дільник частоти призначено для змінення швидкості змінення вхідного сигналу $\nu = \frac{A_{max}}{T}$, де T – період часу, за який вихідний сигнал досягає заданої амплітуди.

Специфікою Фібоначчієвого ЦАП є те, що ваги його розрядів пропорційні числам Фібоначчі, тобто в ньому використовується різновид надлишкової позиційної системи числення.

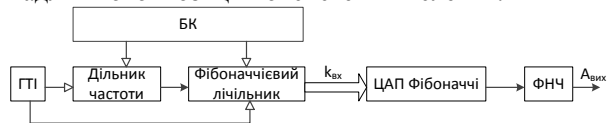


Рисунок 1. – Узагальнена структурна схема синтезатора монотонно зростаючого аналогового сигналу

Системи числення з ваговою надлишковістю або надлишкові позиційні системи числення (НПСЧ) [4] можна розбити на дві групи: з

дробовими вагами розрядів і з цілочисловими вагами розрядів

До НПСЧ із дробовими вагами розрядів, зокрема, відносяться так звані системи числення золоті p -пропорції, запропоновані О.П. Стаховим [7]. Прикладом НПСЧ із цілочисловими вагами можуть служити системи числення на основі r -чисел Фібоначчі [7].

Слід зазначити, що використання систем числення з ваговою надлишковістю в ЦАП та АЦП має ряд переваг порівняно з класичною двійковою системою. Зокрема:

- можливість компенсації розривів у характеристиці перетворення, що виникає в разі наявності відхилення ваг розрядів ЦАП [4];
- підвищення точності ЦАП шляхом зменшення статичних похибок перетворення, що досягається за рахунок використання властивостей НПСЧ [4];
- підвищення швидкодії ЦАП за рахунок зменшення динамічних похибок перетворення, що досягається за рахунок використання властивостей НПСЧ [4];
- зменшення глітчів в ЦАП.

Поява глітчів дуже негативно впливає як на швидкодію, так і на точність перетворення і може призвести до значних похибок і спотворення вихідного сигналу ЦАП. Взагалі кажучи, глітчї можуть мати досить складну форму, проте найважливішими параметрами є амплітуда глітчів та час затухання (стабілізації) глітчів. Оскільки глітчї виникають під час перемикавання розрядів ЦАП (зміни кодової комбінації), амплітуда та глітчів залежить від одночасної дії багатьох факторів, зокрема:

- загальної кількості розрядів ЦАП;
- кількості розрядів, що перемикаються за 1 такт;
- асинхронності вмикання/вимикання цифрових ключів;
- конкретних параметрів цифрових ключів, а саме «паразитних» характеристик елементів, на яких виконані ключі;
- характеристик системи числення, на основі якої виконано ЦАП;
- алгоритму перетворення;
- конкретного значення керуючого сигналу (напруги або струму);
- вихідного опору ЦАП.

Виникнення глітчів пов'язано з затримкою вмикання/вимикання розрядів при зміні кодової комбінації при максимальному сумарному значенню ваг розрядів, що перемикаються. Найгірший випадок виникає коли старший розряд уже ввімкнувся, а молодші ще не встигли вимкнутись, тобто сигнал на виході ЦАП дорівнюватиме сумі цих розрядів, а значення глітчів Агл визначається як сума розрядів, що вимикаються.

У випадку класичної двійкової системи числення для n -розрядного ЦАП максимальна кількість розрядів, що перемикаються одночасно дорівнює $n-1$, тобто максимальний імпульс виникне під час зміни кодової комбінації вигляду $011\dots11$ на $100\dots00$, а відносна сума ваг цих розрядів дорівнює $2_{n-1}-1$, або

$$A_{\text{гліч}} = Q_{n-1} - Q_0 \quad (1)$$

де Q_i – значення i -го розряду.

Використовуючи формулу (1) можна розрахувати максимальне значення глітча і для надлишкових позиційних систем числення.

Слід зазначити, що для дослідження характеристик ЦАП більш важливою величиною є не абсолютне, а відносне значення глітча $\delta A_{\text{гліч}}$, тобто його відношення до діапазону перетворення ЦАП:

$$\delta A_{\text{гліч}} = \frac{A_{\text{гліч}}}{D(n)} \quad (2)$$

Підставляючи значення з формули (1) в формулу (2), можна розрахувати відносне значення глітча для двійкової системи числення:

$$\delta A_{\text{гліч}} = \frac{Q_{n-1} - Q_0}{D_2(n)} = \frac{2^{n-1} - 2^0}{2^n} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2^n}$$

Очевидно, що при збільшенні n відносне значення глітча буде стрімко наближатись до 50%, тобто для двійкової системи числення глітч становить майже половину діапазону перетворення.

Застосування надлишкових позиційних систем числення дає змогу значно зменшити кількість розрядів, що перемикаються одночасно (особливо в багаторозрядних ЦАП) порівняно з двійковою системою числення, а отже і зменшити амплітуду глітча. Це досягається за рахунок того, що за умови сталого діапазону значення абсолютне глітча $A_{\text{гліч}}$ зменшується, а отже зменшується і відносне значення.

У випадку використання систем числення на основі p -чисел Фібоначчі для $p > 0$ доцільно застосувати так звані «згорнуто-розгорнуті» числа Фібоначчі – модифікацію p -чисел Фібоначчі, в якій для вибраного числа розрядів кодування чисел складається з двох етапів:

- до досягнення максимально можливого числа, представленого в “нормальній” формі, кодування виконується як для класичних p -чисел Фібоначчі;
- після досягнення максимально можливого числа в нормальній формі кодування слід продовжити за правилами, аналогічними класичній двійковій системі.

Це дає змогу зменшити загальну кількість розрядів на p порівняно з класичними p -числами Фібоначчі.

У таблиці 1 та представлено кодування чисел за допомогою згорнуто-розгорнутих кодів Фібоначчі для $p=1$. Діапазон перетворення відповідає 5 двійковим розрядам (32 еквівалента

молодшого розряду) та використовує 6 розрядів (33 еквіваленти молодшого розряду). Тут відносне значення глітча дорівнює:

$$\delta A_{\text{гліч}} = \frac{A_{\text{гліч}}}{D(n)} = \frac{Q_{n-1} - Q_0}{D(n)} = \frac{13 - 1}{33} \approx 37\%$$

Таблиця 1 – Декодування «Згорнуто-розгорнутого» 6-ти розрядного коду Фібоначчі для $p=1$

N	Вага розряду						$A_{\text{гліч}}$
	13	8	5	3	2	1	
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	0	1	0	1
...							
20	1	0	1	0	1	0	1
21	1	1	0	0	0	0	7
22	1	1	0	0	0	1	0
23	1	1	0	1	1	0	1
...							
31	1	1	1	1	1	0	1
32	1	1	1	1	1	1	0

Використання вагової надлишковості призводить до подовження розрядної сітки порівняно з двійковою системою числення. Коефіцієнт подовження розрядної сітки можна розрахувати за допомогою формули

$$\gamma_n = \frac{n_\alpha}{n}$$

де n – кількість двійкових розрядів, n_α – кількість розрядів НПСЧ при сумірних діапазонах перетворень.

Таким чином при виборі надлишкової позиційної системи числення для побудови ЦАП потрібно враховувати не тільки значення відносної похибки, але й коефіцієнт подовження розрядної сітки ЦАП. Оцінити ефективність застосування НПСЧ для зменшення глітча можна за допомогою формули:

$$E = \frac{\delta A_{\text{гліч}}(2) - \delta A_{\text{гліч}}(\alpha)}{\gamma_n}$$

де $\delta A_{\text{гліч}}(2)$ – відносне значення глітча для двійкової системи числення, $\delta A_{\text{гліч}}(\alpha)$ – відносне значення глітча для надлишкової системи числення, γ_n – коефіцієнт подовження розрядної сітки.

Для двійкової системи числення ефективність рівна 0, оскільки $\delta A_{\text{гліч}}(2) = \delta A_{\text{гліч}}(\alpha)$. В випадку застосування надлишкової системи числення ефективність буде більшою за 0, оскільки $\delta A_{\text{гліч}}(\alpha) < \delta A_{\text{гліч}}(2)$.

У таблиці 2 наведено значення ефективності E для НПСЧ на основі «згорнуто-розгорнутих» кодів Фібоначчі для різних значень p , розрахованих для еквіваленту 14 двійкових розрядів.

Таблиця 2 – Значення ефективності «згорнуто-розгорнутого» коду Фібоначчі для деяких значень p

p	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25
E	0	0,087	0,111	0,121	0,123	0,122	0,119	0,118	0,116	0,114	0,112	0,102	0,092	0,084

Можна зробити висновок, що найбільш ефективним є використання «згорнуто-розгорнутих» кодів Фібоначчі для значень p від 2 до 6-7. Однак одночасно зі збільшенням p стрімко зростає і кількість розрядів n , що є критичним для побудови реальних ЦАП, тобто це ускладнює схемо-технічну реалізацію та збільшує кількість обладнання. Тому оптимальним бачиться використання значення $p=2$.

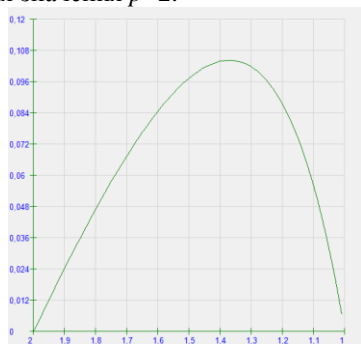


Рисунок 2 – Графік залежності ефективності вибору НПСЧ від основи системи числення

У випадку застосування систем числення з дробовими вагами розрядів можна проаналізувати залежність ефективності від значення основи системи числення α як функцію $E = f(\alpha)$. На рис.2 наведено графік залежності ефективності від вибраної основи системи числення для еквіваленту 14 двійкових розрядів, де значення основи СЧ $\alpha \in (1; 2]$. Тут можна зробити висновок, що ефективність застосування НПСЧ сягає найбільших значень в інтервалі $\alpha \in (1,3; 1,5)$, в який попадає два значення золоті p -пропорції, а саме для $p=2$ та $p=3$. Таким чином при застосуванні НПСЧ з дробовими вагами розрядів оптимальним бачиться використання кодів золоті p -пропорції при $p=2$ та $p=3$.

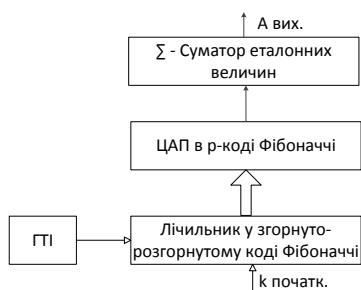


Рисунок 3 – Низькоглітчевий ЦАП на основі згорнуто-розгорнутих кодів Фібоначчі

На рис.3 представлена структурна схема низькоглітчевого цифро-аналогового перетворювача на основі «згорнуто-розгорнутих» кодів Фібоначчі, що була запропонована авторами [8]. Визначальною відмінністю приведеного цифро-аналогового перетворювача є використання лічильника, що реалізує лічбу у згорнуто-розгорнутому коді Фібоначчі.

На рис.4 наведено результат моделювання глітчів у ЦАП, що реалізовані на основі p -чисел Фібоначчі. Яке підтверджує той факт, що застосування «згорнуто-розгорнутих» кодів Фібоначчі призводить до значного зменшення глітчів.

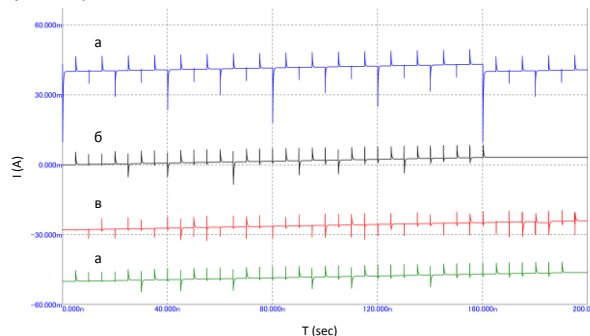


Рисунок 4 – Глітчів в p -розрядному ЦАП на основі: двійкової системи числення (а); p -кодів Фібоначчі зі зменшенням (б); згорнуто-розгорнутих $p=1$ (в) та $p=2$ (г)

III. ВИСНОВКИ

Доведено можливість застосування p -кодів Фібоначчі для зменшення глітчів в ЦАП. Запропоновано алгоритм зменшення глітчів в режимі генерування неперервного аналогового сигналу ЦАП. Оцінено ефективність застосування вагової надлишковості для зменшення рівня глітчів у Фібоначчівому ЦАП паралельної дії.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] By Eva Murphy, Colm Slattery. "Direct Digital Synthesis (DDS) Controls Waveforms in Test, Measurement, and Communications". Analog Dialogue Volume 39, August 2005.
- [2] Cateau, B., Rombouts, P., Weyten, L. "A Digital Calibration Technique for the Correction of Glitches in High-Speed DAC's". IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2007. Pages: 1477-1480.
- [3] Chao Su, Xin Dai, Geiger, R.L. "An ovel dynamic calibration approach for current-steering DACs". Proceedings of IEEE International Workshop on VLSI Design and Video Technology, 2005. Pages:40-43.
- [4] Azarov O.D. Analogue-to-digital digit-by-digit conversion on the base of calculation system with weigh redundancy. Monograph. – Vinnytsia: VNTU, 2010. – 232p.
- [5] Hokazono, K., Kanemoto, D., Pokharel, R., Tomar, A., Kanaya, H., Yoshida, K. "A low-glitch and small-logic-area Fibonacci Series DAC". IEEE 54th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 2011. Pages: 1-4.
- [6] Andersson, K.O., Vesterbacka, M., IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Vol:52, No:11, Nov. 2005, Pages: 2265-2275
- [7] Stakhov A.P. Introduction to the algorithmic measuring system. – M., «Sov. radio», 1977. – 288p.
- [8] Patent. 94085 Ukraine, МПК:H03M 1/46. Digit-to-analogue converter [Text] / Azarov O.D., Murashchenko O.G., Bogomolov S.V., Chernyak O.I. (Ukraine); inventor's application and patent owner Vinnytsia National Technical University. - № u 2014 05694; application 26.05.2014; published 27.10.2014, Rep. № 20. – 7p.