

УДК 621.3.087.92 : 621.3.018.78

Паньків Р.С., Хомич С.В.*

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕОМ

*НДКІ ЕЛВІТ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ НА ТОЧНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЦАП

© Паньків Р.С., Хомич С.В.*, 2000

Розглянуті особливості функціонування процесорних генераторів гармонічних сигналів. Описана методика врахування впливу перехідних процесів на виході цифро-аналогових перетворювачів з метою покращення якості формування вихідних сигналів заданої форми і одночасного значного зменшення кількості точок їх дискретизації.

Зростаючі вимоги до ефективності налагодження і достовірності вимірювальних пристроїв та обладнання для керування технологічними процесами вимагають відповідних засобів метрологічного забезпечення, в першу чергу, високостабільних і точних генераторів гармонічних сигналів. Для досягнення високої стабільності і точності формування вихідних сигналів доцільно їх генерувати на основі числових кодів миттєвих значень за допомогою цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП). Щоби забезпечити високі сервісні можливості генераторів гармонічних сигналів, їх проектують на основі спеціалізованого процесора або мікро-ЕОМ. В теорії перетворення сигналів докладно описаний вплив операцій дискретизації і квантування на точність функціонування ЦАП і, відповідно, вибір їх розрядності та кількості точок дискретизації сигналів. При цьому вплив параметрів вихідних каскадів на точність задавання величини і форми вихідних сигналів потребує додаткового дослідження.

В цифровому генераторі гармонічних сигналів електричне коло формування вихідного сигналу можна представити у вигляді послідовно з'єднаних ЦАП миттєвих значень вихідного сигналу, інтегруючої ланки, яку утворюють спеціально введені для зменшення впливу частоти дискретизації і/або паразитні RC-елементи, та вихідного підсилювача, який підсилює інформативний параметр вихідного сигналу (струм або напругу). Якщо ЦАП має струмовий вихід, то інтегруюча ланка формується RL-елементами.

Розглянемо формування синусоподібного сигналу напруги на основі кодів миттєвих значень N_j , які обчислюються згідно з виразом:

$$N_j = \left[N_m \sin(\omega t_j) \right], \quad (1)$$

де $[E]$ – цілочисельне значення E , що формується, як правило, із заокругленням до найближчого цілого; N_m – найбільше вхідне число ЦАП, $N_m = 2^e - 1$, де e – розрядність ЦАП; ω – кругова частота вихідного сигналу, яка дорівнює $\omega = 2\pi/T$, де T – період коливань; t_j – значення змінної часу в j -ті моменти дискретизації, $t_j = j \cdot \Delta t$, де Δt – крок дискретизації, який дорівнює $\Delta t = T/M$, M – кількість кодів миттєвих значень, що формуються за період коливань; j – порядковий номер коду миттєвого значення, $j=1 \dots M$.

Згідно з кодом миттєвого значення N_j на виході ЦАП формується напруга:

$$u_j = \frac{U_R}{N_m} N_j, \quad (2)$$

де U_R – опорна напруга ЦАП. Згідно з (1) амплітуда сигналу U_m , який генерується, максимальна і дорівнює величині опорної напруги, $U_m = U_R$.

У першому наближенні можна прийняти, що вплив параметрів внутрішніх вузлів та інерційність внутрішніх перехідних процесів ЦАП враховуються в складі зовнішньої інтегруючої ланки. Тобто, перехідний процес формування вихідної напруги сигналу умовно можна розкласти на дві складові:

- розряд попередньо сформованої на виході інтегруючої ланки напруги сигналу $U(t_{j-1})$;
- заряд до рівня напруги u_j , що задається на виході ЦАП кодом біжучого миттєвого значення N_j .

Тобто, виконання цифро-аналогового перетворення кодів миттєвих значень вихідного сигналу описується рекурентним співвідношенням:

$$U(t_j) = U(t_{j-1}) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) + u_j \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right), \quad (3)$$

де $U(t_j)$ – отримане в кінці j -го інтервалу дискретизації значення вихідного сигналу; τ – постійна часу інтегруючої ланки.

Очевидно, що спочатку в момент t_0 значення вихідного сигналу дорівнює нулю $U(t_0)=0$. Але враховуючи, що формується періодичний сигнал, в біжучому періоді генерації при доведенні заряду напруги до рівня першого миттєвого значення u_1 початкове значення вихідного сигналу дорівнює значенню, що сформувався в попередньому циклі його генерації внаслідок цифро-аналогового перетворення останнього миттєвого значення, $U(t_0)=U(t_N)$. Тому можна вважати, що початкове значення вихідного сигналу при використанні виразу (3) дорівнює:

$$U(t_0) = u_{N-1} \left(1 + \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right). \quad (4)$$

Співвідношення (3) для подальшого спрощення аналітичних виразів доцільно записати у вигляді:

$$U(t_j) = u_j + \left(U(t_{j-1}) - u_j\right) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right). \quad (5)$$

З останнього виразу видно, що при виконанні генерації сигналів на основі цифро-аналогового перетворення кодів їх миттєвих значень, навіть якщо вихідні підсилюючі каскади мають практично лінійну передавальну характеристику, все одно вносяться нелінійні спотворення. Потрібно зазначити, що залежно від співвідношення між кроком дискретизації Δt і постійною часу інтегруючої ланки τ , також може зменшуватись амплітуда вихідного сигналу U_m та вноситися додатковий фазовий зсув.

Діюче значення сформованого гармонічного сигналу можна обчислити методом інтеграла Дюамеля. Для цього розіб'ємо весь інтеграл за період T на суму N інтегралів, кожен з яких відповідає формуванню вихідного сигналу між двома суміжними точками дискретизації:

$$\dot{U}' = \sqrt{\frac{1}{\Delta t \cdot N} \sum_{j=1}^N \int_{t_{j-1}}^{t_j} U^2(t) dt}. \quad (6)$$

Для визначення кожного інтегралу введемо допоміжну змінну v , яка відповідає часу в межах біжучого j -го інтервалу і змінимо межі інтегрування:

$$\int_{t_{j-1}}^{t_j} U^2(t) dt = \int_0^{\Delta t} U^2(t_{j-1} + v) dv. \quad (7)$$

На основі (5) інтеграл Дюамеля для j -ого інтервалу сигналу дорівнює:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\Delta t} \left[u_j + (U(t_{j-1}) - u_j) \exp\left(-\frac{v}{\tau}\right) \right]^2 dv = \\ & = \Delta t u_j^2 + 2\tau u_j (U(t_{j-1}) - u_j) \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right) + \frac{\tau}{2} (U(t_{j-1}) - u_j)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right)\right) \end{aligned} \quad (8)$$

Тобто, діюче значення сформованого сигналу становить:

$$\begin{aligned} \dot{U}' = & \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[u_j^2 + \frac{2\tau}{\Delta t} u_j (U(t_{j-1}) - u_j) \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right) + \right.} \\ & \left. + \frac{\tau}{2\Delta t} (U(t_{j-1}) - u_j)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right)\right) \right]} \end{aligned} \quad (9)$$

Внаслідок інерційності процесу встановлення рівнів напруги вихідного сигналу u_j , які задаються відповідними кодами миттєвих значень N_j , особливо при великому значенні постійної часу інтегруючої ланки τ , оцінювати нелінійні спотворення за допомогою середньоквадратичного відхилення неефективно. Для визначення ступеня відмінності сформованого сигналу від синусоподібного більш доцільно використовувати коефіцієнт амплітуди k_a і коефіцієнт форми k_f .

Коефіцієнт амплітуди k_a визначається як відношення амплітуди вихідного сигналу до його діючого значення, який для синусоподібного сигналу дорівнює $k_a = \sqrt{2}$. Коефіцієнт амплітуди сформованого сигналу становить $k'_a = \frac{U_m}{\dot{U}'}$.

Коефіцієнт форми k_f дорівнює відношенню діючого значення періодичного сигналу до його середньовипрямленого значення (середнього за півперіода). Враховуючи, що середньовипрямлене значення синусоподібного сигналу становить $\bar{U} = \frac{2}{\pi} U_m$, розрахунковий коефіцієнт форми дорівнює $k_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$.

Середньовипрямлене значення сформованого сигналу можна визначити аналогічно, як і його діюче значення:

$$\bar{U}' = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| u_j + \frac{\tau}{\Delta t} (U(t_{j-1}) - u_j) \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right) \right|. \quad (10)$$

Тобто, коефіцієнт форми отриманого сигналу становить $k'_f = \frac{\dot{U}'}{\bar{U}'}$.

Для покращання інтерполяції форми сигналу між його дискретними значеннями доцільно зменшити співвідношення між кроком дискретизації Δt і постійною часу

інтегруючої ланки τ . Зменшення кроку дискретизації Δt обмежене, по-перше, швидкодією ЦАП, а по-друге, об'ємом запам'ятовуючого пристрою, який використовується для зберігання масиву кодів миттєвих значень сигналу. При цьому потрібно зазначити, що збільшення кількості точок дискретизації вихідного сигналу і відповідне зростання кількості переривань від таймера для запису кодів миттєвих значень u_j у вхідний регістр ЦАП, значно підвищують вимоги до продуктивності процесора, який додатково повинен забезпечувати функціонування пристрою в цілому і виконувати необхідні сервісні функції. Тому для покращання якості відтворення форми заданого сигналу доцільно збільшувати значення постійної часу інтегруючої ланки τ .

Згідно з виразом (5) при зменшенні співвідношення між кроком дискретизації Δt і постійною часу інтегруючої ланки τ можуть виникнути значні похибки формування напруги вихідного сигналу в точках його дискретизації, що може зменшити його діюче значення, а також спотворити форму вихідного сигналу. Для компенсації відмінності напруги на виході інтегруючої ланки U_j від розрахункової величини u_j , вихідну напругу ЦАП потрібно задавати з врахуванням узгоджуючої складової Δu_j , значення якої становить:

$$\Delta u_j = \frac{u_j - U(t_j)}{1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)}. \quad (11)$$

Тобто, висока якість формування гармонічних сигналів досягається компенсацією інерційності формування заданих рівнів напруг, тобто узгодженням кодів миттєвих значень заданого сигналу з параметрами вузлів цифро-аналогового перетворення конкретного генератора. Узгодження значень точок дискретизації вихідного сигналу полягає в додаванні до коду миттєвого значення N_j , який обчислений згідно з виразом (1), додаткової величини:

$$N'_j = N_j + \left[\frac{N_m}{U_R} \Delta u_j \right]. \quad (12)$$

В даній статті прийнято, що вихідні каскади цифрового генератора мають практично лінійну передавальну характеристику і не розглядається вплив нестабільності їх параметрів та зовнішніх дестабілізуючих факторів на якість генерації гармонічних сигналів.

Основні параметри якості формування синусоподібного сигналу

τ , мкс	$\Delta t/\tau$	N_j			N'_j		
		$\delta \dot{U}'$, %	$\delta k'_a$, %	$\delta k'_f$, %	$\delta \dot{U}'$, %	$\delta k'_a$, %	$\delta k'_f$, %
100	3.12	-0.08958	0.08966	11.21389	-0.05332	0.05335	0.01009
120	2.60	-0.11313	0.11326	11.22149	-0.05095	0.05097	-0.00059
140	2.23	-0.14012	0.14032	11.23246	-0.03775	0.03776	-0.01162
160	1.95	-0.17074	0.17103	11.24679	-0.00923	0.00923	-0.02065
180	1.74	-0.20507	0.20549	11.24690	-0.02643	-0.02643	-0.02857
200	1.56	-0.24316	0.24375	11.22197	-0.08597	-0.08589	-0.03344
220	1.42	-0.28504	0.28585	11.20330	-0.16295	-0.16269	-0.03569
240	1.30	-0.33071	0.33181	11.19053	-0.26079	-0.26011	-0.03363
260	1.20	-0.38017	0.38162	11.18332	-0.35131	-0.35008	-0.03594

В таблиці наведені результати дослідження ефективності описаної методики використання узгоджених кодів N'_j для генерації 12-розрядним ЦАП гамонічних сигналів частотою 50 Гц ($\Delta t=312,5$ мкс). При цьому кількість точок дискретизації $N = 64$. Для порівняння наведені відносні похибки формування діючого значення $\delta \dot{U}'$ і значень коефіцієнтів амплітуди $\delta k'_a$ та форми $\delta k'_f$ синусоподібних сигналів, які сформовані на основі кодів миттєвих значень N_j , отриманих згідно з виразом (1), і узгоджених кодів N'_j , обчислення яких виконувалось за співвідношеннями (11) та (12). При цьому розрахункові величини даних параметрів такі: діюче значення напруги синусоподібного сигналу $\dot{U}=2895,6$ (В); коефіцієнт амплітуди $k_a = 1,14142$; коефіцієнт форми $k_f = 1,11072$.

Аналізуючи наведені дані, можна зробити такі висновки:

- значення параметрів вихідних каскадів генераторів гармонічних сигналів мають істотний вплив на якість формування вихідних сигналів. Внаслідок інерційності ЦАП виникають нелінійні спотворення, які впливають не тільки на формування діючого значення гармонічних сигналів, а також і на їх форму;

- для покращання інтерполяції вихідних сигналів між їх точками дискретизації і, відповідно, усунення нелінійних спотворень, не обов'язково зменшувати крок їх дискретизації, що виконувалось традиційно, а достатньо виконати узгодження кодів миттєвих значень згідно з (11) та (12);

- додаткові дослідження показали, що оптимальне значення співвідношення між кроком дискретизації Δt та постійною часу інтегруючої ланки τ лежить в інтервалі від 1,5 до 2 і залежить від розрядності e ЦАП, який на основі кодів миттєвих значень виконує формування вихідного сигналу;

- при заданій продуктивності процесора або мікро-ЕОМ, на основі яких розробляється цифровий генератор, за рахунок введення додаткової РС-ланки на виході ЦАП і узгодження кодів миттєвих значень можна значно збільшити частоту дискретизації вихідних сигналів і, за рахунок цього, спростити внутрішню структуру і розширити сервісні можливості пристрою.

УДК 681.3

Почаєвець О.М.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕОМ

БІБЛІОТЕКА ФУНКЦІЙ ШВИДКОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ РЯДКОВОГО ТИПУ

© *Почаєвець О.М., 2000*

Запропоновано швидку реалізацію стандартних функцій опрацювання даних рядкового типу, згрупованих в бібліотеку з метою їх використання в програмах, написаних мовою С.

Вступ. Стандарт мови ANSI C передбачає використання набору рядкових функцій після підключення директивою `include` їх опису з файлу `string.h` до програми користувача: `#include <string.h>`. Пропоновані стандартом ANSI рядкові функції мають таку низку особливостей [1].