

СИНТЕЗ ЧИСЛО-ІМПУЛЬСНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІЗ ЗМІННОЮ РОЗРЯДНІСТЮ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У ДВІЙКОВОМУ КОДІ

ã Горпенюк А.Я., Лагун А.Е., Максимович В.М., 2008

Досліджуються методи структурного синтезу число-імпульсних функціональних перетворювачів із змінною розрядністю, які працюють в двійковому коді. Наведено рекомендації щодо використання критеріїв метрологічної доцільності у теорії структурного синтезу число-імпульсних функціональних перетворювачів.

This article is devoted development the methods of pulse-number functional converters structural synthesis with a variable range, which work in a binary code. Recommendations are also resulted in relation to the use of metrology expedience criteria in the theory of pulse-number functional converters synthesis.

1. Мета роботи. Метою цієї роботи у напрямку розвитку теорії синтезу число-імпульсних функціональних перетворювачів (ЧІФП) на базі цифрових інтеграторів (ЦІ) є:

- розроблення методики синтезу структур перетворювачів із змінною розрядністю як таких, що забезпечують найефективніше розширення динамічного діапазону за вхідним число-імпульсним кодом (ЧІК);
- введення у теорію синтезу ЧІФП критеріїв метрологічної і технологічної доцільності їхнього використання.

2. Розроблення методики синтезу. Виконані дослідження дали змогу запропонувати таку послідовність синтезу перетворювачів, що працюють у двійковому коді:

- синтез ЧІФП із фіксованою розрядністю з використанням відомих методик;
- визначення піддіапазонів ЧІК, що відповідають фіксованим значенням кількості розрядів ЧІФП;
- визначення для кожного із піддіапазонів ЧІК початкових станів структурних елементів, за яких забезпечується найбільша точність перетворення;
- оцінка ЧІФП на відповідність певним критеріям стосовно зовнішнього технічного середовища, наприклад, на відповідність критеріям метрологічної доцільності для вимірювальних перетворювачів;
- побудова блока керування розрядністю;
- визначення і побудова структурних елементів ЧІФП, що мають під час роботи змінювати кількість задіяних розрядів;
- визначення ваг розрядів коду результату і, за необхідності, побудова блока формування результату;
- побудова структури ЧІФП загалом;
- оцінка швидкодії і технологічної доцільності реалізації пристрою.

3. Реалізація обернено пропорційної функції. Проілюструємо запропоновану методику на прикладі перетворювача для реалізації обернено пропорційної функції. Перетворювач, кількість розрядів якого фіксована, синтезують за відомою методикою [1] на основі системи рівнянь

Шеннона. Останню отримують, розкладаючи у систему диференціальних рівнянь певний вид породжуючого диференціального рівняння обернено пропорційної залежності. Такий розклад неоднозначний. У [2, 3] показано, що диференціальне рівняння

$$dx = -\frac{1}{x^2} dn, \quad (1)$$

що породжує залежність

$$x = \frac{1}{n}, \quad (2)$$

можна розкласти у систему рівнянь Шеннона сімома різними способами, в кожному з яких фігурують рівняння такого виду, що можуть бути наближено відтворені на ЦІ. Для кожної з цих систем можна побудувати число-імпульсну структуру. У [2] показано, що серед цих структур найточнішою є структура, побудована за системою

$$\begin{cases} dh = \frac{Y1}{2^s} dn, \\ dx = -dY1 = \frac{2^s}{n} dh \end{cases} \quad (3)$$

У системі (3) перше рівняння може бути відтворене за допомогою ЦІ, в якому dn – приріст кількості вхідних імпульсів, dh – приріст кількості вихідних імпульсів, $Y1$ – керуючий код, s – кількість двійкових розрядів. Друге рівняння системи може бути реалізоване на число-імпульсному дільнику (ЧІД), побудованому на ЦІ з імпульсними зворотним зв'язком (ІЗЗ), для якого dh і dx – прирости кількостей вхідних і вихідних імпульсів відповідно, n – керуючий код.

На основі системи (3) можна побудувати кілька різних структур ЧІФП з фіксованою розрядністю. Це пояснюється тим, що як ЦІ можуть бути використані інтегратори з паралельним перенесенням на основі нагромаджувальних суматорів (НС) і з послідовним перенесенням на основі двійкових помножувачів (ДП). Окрім цього, ЧІД можуть бути побудовані з використанням від'ємного зворотного зв'язку ВЗЗ чи додатного зворотного зв'язку (ДЗЗ) [8]. Зрозуміло, що вибір структури з фіксованою розрядністю для реалізації подальшої процедури синтезу пристрою із змінною розрядністю повинен ґрунтуватись на забезпеченні кращих метрологічних характеристик, для чого можуть бути використані методи порівняння характеристик різних ЧІФП з комплексним урахуванням їхньої точності і швидкодії. На цьому етапі під час визначення швидкодії необхідно ураховувати лише структурні особливості введення ІЗЗ, оскільки остаточне визначення швидкодії можливе лише після синтезу окремих вузлів перетворювача із змінною розрядністю і побудови його принципової схеми загалом. Під структурними особливостями введення ІЗЗ треба, передовсім, розуміти кількість імпульсів зворотного зв'язку, викликану одним вхідним імпульсом інтегратора.

Виконані дослідження [4] показали, що одним з найвдаліших, з погляду забезпечення високих метрологічних характеристик, є варіант побудови перетворювача, структурна схема якого наведена на рис. 1.

У цій структурі система рівнянь (3) реалізується за допомогою НС (до складу якого входять комбінаційний суматор КС1 і регістр Рг1) і ЧІД (що містить НС, на комбінаційному суматорі КС2 і регістрі Рг2, а також схему додавання імпульсних потоків СД). Керуючі коди цифрових інтеграторів $Y1$ і n формуються у віднімаючому лічильнику Лч1 і підсумовуючому лічильнику Лч2, відповідно. Керування ЧІД відбувається оберненим кодом числа в Лч2.

Із (3) випливає

$$-\frac{dY1}{Y1} = \frac{dn}{n}. \quad (4)$$

Пристрій забезпечує реалізацію обернено пропорційної залежності, починаючи з моменту надходження на його вхід 2^{s-1} -го імпульсу. Число в Лч1 зменшується, починаючи із значення 2^s . Отже, після інтегрування рівняння (4), маємо:

$$-\int_{2^s}^{Y1} \frac{dY1}{Y1} = \int_{2^{s-1}}^n \frac{dn}{n}, \quad (5)$$

$$Y1 = 2^{2s-1} \frac{1}{n}. \quad (6)$$

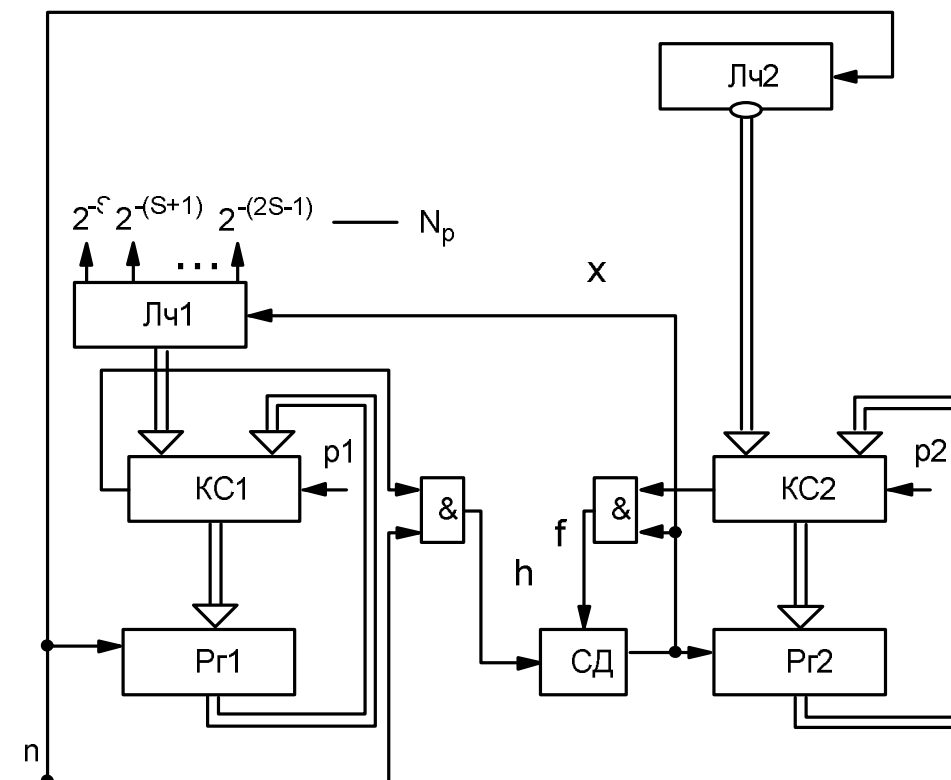


Рис. 1. ЧФП з фіксованою розрядністю

Якщо вважати, що вага молодшого розряду коду результату N_p у лічильнику Лч1 становить $2^{-(2s-1)}$, отримаємо:

$$N_p = 2^{-(2s-1)} Y1, \quad (7)$$

$$N_p = \frac{1}{n}. \quad (8)$$

Отже, перетворювач забезпечує реалізацію заданої функції (8) у діапазоні

$$2^{s-1} \leq n \leq 2^s - 1, \quad (9)$$

де $s = 1, 2, 3, 4, \dots$. Швидкодія пристрою достатньо висока, оскільки кожен вхідний імпульс може спричинити формування не більше ніж одного імпульсу в колі ДЗЗ.

Для кожного значення s , тобто для кожного із діапазонів (9), необхідно визначити початкові стани послідовнісних структурних елементів пристрою, що забезпечують мінімальні похибки перетворення. Критерієм оптимальності можуть бути значення коефіцієнта метрологічної доцільності $k_m(n)$ [5]. До послідовнісних елементів перетворювача належать лічильники Лч1, Лч2 і регістри Рг1 і Рг2. Початкові стани лічильників (2^s – для Лч1, 2^{s-1} – для Лч2) визначаються

принципом роботи пристрою із фіксованою розрядністю. Оптимальні початкові стани регістрів (2^{s-1} – для Pг1 і Pг2) визначені за допомогою імітаційного моделювання.

На рис. 2 наведено максимальні, для кожного із піддіапазонів (9), значення $k_m(n)$, близькість до одиниці яких свідчить про задовільну точність перетворення.

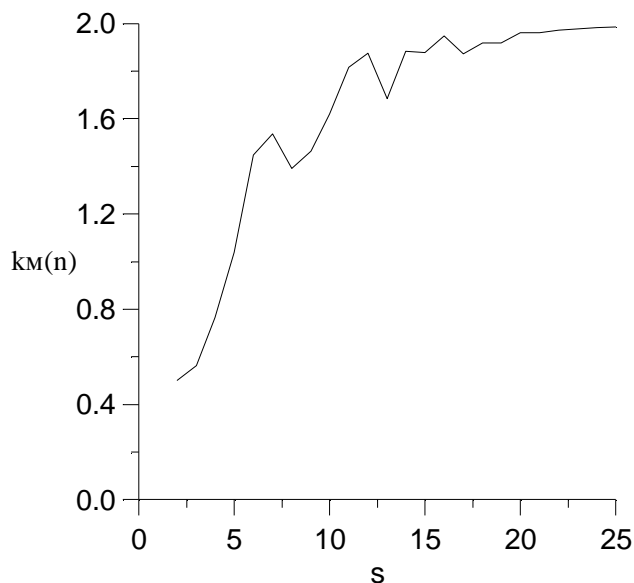


Рис. 2. Максимальні значення $k_m(n)$ за піддіапазонами

На цьому закінчується процедура синтезу ЧФП із фіксованою розрядністю і починається синтез структури із змінною розрядністю. На цьому етапі необхідно, зважаючи на принцип, покладений в основу побудови таких пристроїв, синтезувати структуру ЧФП, яка, у кожному із піддіапазонів (9) вхідного ЧК, працює ідентично до структур з фіксованою розрядністю (рис. 1) при $s = 1, 2, \dots, m$ і, отже, забезпечує реалізацію заданої функції у діапазоні

$$1 \leq n \leq 2^m - 1, \quad (10)$$

де m – максимальна кількість розрядів основних структурних елементів пристрою. Перетворення повинно відбуватись без будь-яких втрат точності, за мінімальних втрат швидкодії і складності. Інакше кажучи, необхідно сумістити в одній структурі із змінною розрядністю m структур з фіксованою розрядністю, побудованих для $s = 1, 2, \dots, m$.

Для реалізації такого суміщення необхідно, з урахуванням логіки функціонування перетворювача, визначити структурні елементи, що мають змінювати розрядність, синтезувати їхні схеми і спроектувати відповідний пристрій керування. Останній повинен формувати на своїх виходах сигнали, значення яких залежать від того, в якому з піддіапазонів (9) працює пристрій, тобто від значення s .

4. Дослідження синтезованих структур. Виконані дослідження показали, що пристрій керування, для більшості ЧФП із змінною розрядністю, які реалізують різні функціональні залежності, може бути універсальним. Вхідними сигналами для нього повинні бути виходи розрядів того структурного елемента, в якому міститься код, що визначає значення меж піддіапазонів (9). У випадку, котрий розглядається, таким структурним елементом є лічильник Лч2 (рис. 1).

У табл. 1 наведено значення вхідних і вихідних сигналів перетворювача кодів (ПК), що може бути використаний як керуючий пристрій. Тут b_0, \dots, b_{m-1} – значення розрядів числа n ; d_0, \dots, d_{m-1} і c_0, \dots, c_{m-1} – значення розрядів вихідних кодів D і C; * – довільне значення розряду. На

додатковому виході ПК також формуються імпульсні сигнали, призначені для установлення елементів структури у визначені початкові стани на початку кожного із піддіапазонів (9).

Таблиця 1

Вхідні і вихідні сигнали керуючого пристрою

S	Вхідний код						Вихідні коди											
	n						D					C						
	b_{m-1}	b_{m-2}	...	b_2	b_1	b_0	d_{m-1}	d_{m-2}	...	d_2	d_1	d_0	c_{m-1}	c_{m-2}	...	c_2	c_1	c_0
M	1	*	...	*	*	*	1	1	...	1	1	1	1	0	...	0	0	0
m-1	0	1	...	*	*	*	0	1	...	1	1	1	0	1	...	0	0	0
...
3	0	0	...	1	*	*	0	0	...	1	1	1	0	0	...	1	0	0
2	0	0	...	0	1	*	0	0	...	0	1	1	0	0	...	0	1	0
1	0	0	...	0	0	1	0	0	...	0	0	1	0	0	...	0	0	1

Аналіз обернено пропорційного перетворювача з фіксованою розрядністю (рис. 1), з метою побудови на його основі пристрою із змінною розрядністю, показує, що останній може бути побудований з урахуванням таких обставин:

- Лч2 є звичайним підсумовуючим лічильником (тобто його розрядністю не потрібно керувати) і не потребує будь-яких додаткових установлень у разі зміни піддіапазонів (9), оскільки він лише підраховує вхідні імпульси n;
- Лч1 є звичайним віднімаючим лічильником, в який на початку кожного із піддіапазонів (9), як випливає з виразу (5), необхідно записати число 2^s ;
- нагромаджувальні суматори на КС1, Рг1 і КС2, Рг2 повинні змінювати свою розрядність у ході роботи залежно від значень меж піддіапазонів (9) і, крім того, в Рг1 і Рг2, як було встановлено раніше, повинні записуватись числа 2^{s-1} на початку кожного із піддіапазонів;
- існує необхідність побудови блока виведення коду результату N_p , оскільки, як випливає з виразу (7), ваги розрядів N_p , що відповідають однаковим розрядам числа Y1 в Лч1, є різними для різних піддіапазонів (9), тобто для різних значень s.

Структури ЦІ, розрядність яких може змінюватись залежно від значень вихідних кодів D і С пристрою керування, були запропоновані нами у роботах [6, 7]. Структури достатньо універсальні, оскільки вони можуть використовуватись для побудови різних ЧФП, що реалізують різні функціональні залежності.

Як було зазначено вище, в аналізованому прикладі існує необхідність побудови блока формування коду результату N_p . Зауважимо, що необхідність у синтезі таких блоків виникає тільки в окремих випадках, коли загальна кількість розрядів N_p та кількість розрядів лічильника (регістра) результату неоднакові і немає жорсткої прив'язки між ними.

На основі рівняння (7) можна записати:

$$\begin{aligned}
 N_p &= 2^{-1} \cdot Y1 \text{ при } s = 1, \\
 N_p &= 2^{-3} \cdot Y1 \text{ при } s = 2, \\
 &\dots\dots\dots \\
 N_p &= 2^{-(2m-1)} \cdot Y1 \text{ при } s = m.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Отже, код результату перетворення N_p може бути поданий, через значення p_i своїх двійкових розрядів, так:

$$N_p = \sum_{i=0}^{2m-2} p_i 2^{-(2m-1)+i} . \quad (12)$$

Число Y1, що формується у лічильнику Лч, подамо у вигляді

$$Y1 = \sum_{i=0}^{m-1} v_i 2^i , \quad (13)$$

де v_i – значення його двійкових розрядів.

У табл. 2 наведена відповідність між розрядами чисел N_p і Y1 для різних значень s , що задають межі піддіапазонів (9).

Таблиця 2

Відповідність між розрядами чисел N_p і Y1

S	N_p												
	P_{2m-2}	P_{2m-3}	P_{2m-4}	P_{2m-5}	P_{2m-6}	...	P_m	P_{m-1}	P_{m-2}	...	P_2	P_1	P_0
	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-4}	2^{-5}	...	$2^{-(m-1)}$	2^{-m}	$2^{-(m+1)}$...	$2^{-(2m-3)}$	$2^{-(2m-2)}$	$2^{-(2m-1)}$
1	V_0					...							
2		V_1	V_0			...							
3			V_2	V_1	V_0	...							
...
m-1						...	V_{m-2}	V_{m-3}	V_{m-4}	...	V_0		
M						...		V_{m-1}	V_{m-2}	...	V_2	V_1	V_0

На підставі даних табл. 2 може бути синтезований блок формування коду результату. Робота блока, що керується вихідним кодом С пристрою керування (табл. 1), для парних m описується логічними рівняннями:

$$\begin{aligned}
 p_0 &= v_0 c_{m-1}, \\
 p_1 &= v_1 c_{m-1}, \\
 p_2 &= v_0 c_{m-2} + v_2 c_{m-1}, \\
 p_3 &= v_1 c_{m-2} + v_3 c_{m-1}, \\
 &\dots \\
 p_{m-2} &= v_0 c_{m/2} + v_2 c_{m/2+1} + \dots + v_{m-2} c_{m-1}, \\
 p_{m-1} &= v_1 c_{m/2} + v_3 c_{m/2+1} + \dots + v_{m-1} c_{m-1}, \\
 p_m &= v_0 c_{m/2-1} + v_2 c_{m/2} + \dots + v_{m-2} c_{m-2}, \\
 &\dots \\
 p_{2m-5} &= v_1 c_2 + v_3 c_3, \\
 p_{2m-4} &= v_0 c_1 + v_2 c_2, \\
 p_{2m-3} &= v_1 c_1, \\
 p_{2m-2} &= v_0 c_0.
 \end{aligned} \quad (14)$$

Структурна схема ЧФП із змінною розрядністю, побудована з використанням описаних блоків, наведена на рис. 3.

В його склад входять перетворювачі кодів ПК1 і ПК2, перший з яких реалізує систему рівнянь (14) і, отже, виконує функцію формування коду результату, другий – формує на своїх виходах сигнали згідно з табл. 1, тобто виконує функцію керуючого пристрою. На виході ПК2

формується також імпульсний сигнал, що встановлює лічильник Лч1 і регістри Pr1, Pr2 у початкові стани на початку кожного із піддіапазонів (9).

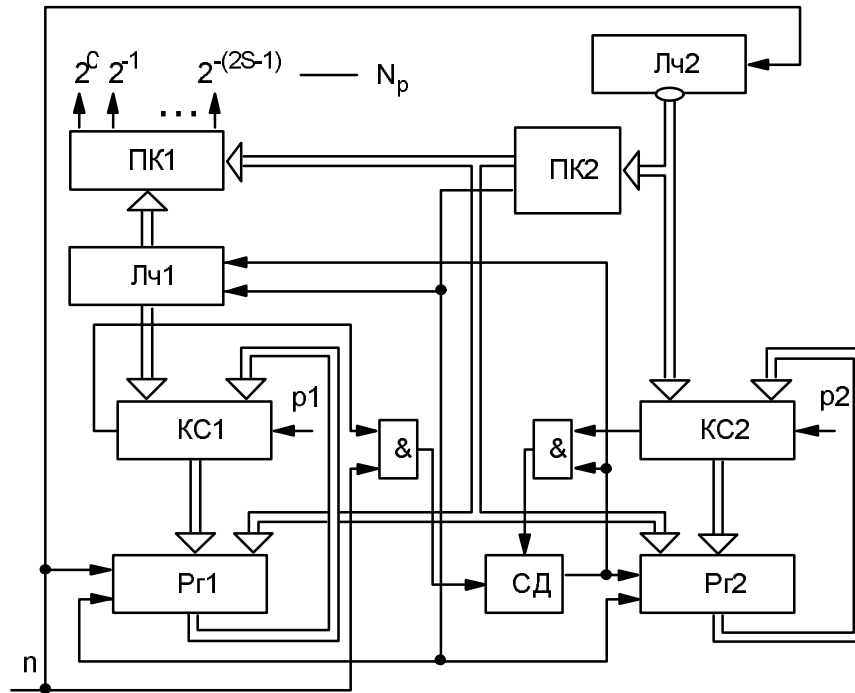


Рис. 3. ЧДФП із змінною розрядністю

На завершальному етапі синтезу ЧДФП необхідно визначити його швидкодію і оцінити технологічну доцільність його реалізації.

5. Висновки. Швидкодія перетворювача визначається характером імпульсного зворотного зв'язку і швидкодією його окремих блоків: нагромаджувальних суматорів, лічильників, перетворювачів кодів.

Синтезований пристрій не має в своєму складі елементів пам'яті (як окремих функціональних елементів) і тому оцінка технологічної доцільності може бути зведена до можливості його реалізації на ПЛІС залежно від кількості розрядів.

1. Дудыкевич В.Б. Число-импульсные измерительные преобразователи: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Львов, 1991. – 36 с.
2. Горпенюк А.Я. Реверсивні число-імпульсні функціональні перетворювачі: Автореф. дис. ... к-та техн. наук. Львів, 1997. – 18 с.
3. Алькаев М.И., Клисторин И.Ф., Токарев А.С., Щербаченко А.М. Многоканальный преобразователь “Частота-код” для ввода данных от частотных датчиков в УВМ “Днепр-1” // Автометрия, 1972. – № 2. – С. 82–87.
4. Дудыкевич В.Б., Баран Р.Д., Максимович В.М., Мороз Л.В. Використання обернено пропорційних перетворювачів із змінною розрядністю для вимірювання частоти // Вісник ДУ “Львівська політехніка” “Радіоелектроніка та телекомунікації”. – 2000. – № 387. – С. 212–216.
5. Максимович В.М. Двійково-десятковий обернено пропорційний перетворювач число-імпульсного коду // Міжвідомчий збірник наукових праць. Відбір і обробка інформації. – 2006. – № 24. – С. 71–76.
6. Горпенюк А.Я., Дудыкевич В.Б., Максимович В.М. Пристрої для ділення число-імпульсного коду на паралельний код на інтеграторах з паралельним переносом // Вісник ДУ “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. – 1996. – № 305. – С. 34–39.
7. Горпенюк А.Я., Максимович В.М. Пристрої інтегрування число-імпульсних послідовностей із змінною вагою імпульсів // Вісник ДУ “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. – 1996. – № 305. – С. 39–42.