

А.Я. Горпенюк, В.Б. Дудикевич, Н.М. Лужецька
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра захисту інформації

КОНВЕЄРНИЙ СИНУСНО-КОСИНУСНИЙ ЧИСЛО-ІМПУЛЬСНИЙ ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

© Горпенюк А.Я., Дудикевич В.Б., Лужецька Н.М., 2009

Подано результати синтезу та дослідження конвеєрної структури синусно-косинусного число-імпульсного функціонального перетворювача. Показано, що максимальна частота роботи такої структури є значно вищою за максимальну частоту роботи класичної структури. Запропоновано способи підвищення точності конвеєрної структури синусно-косинусного перетворювача.

The results of conveyor structure of sine-cosine pulse-number functional transformer synthesis and research are given. Maximal work frequency such structure is considerably higher than maximal work frequency of classic structure. Also are offered the methods of conveyor structure of sine-cosine transformer exactness improvement.

Постановка проблеми. Синусно-косинусні число-імпульсні функціональні перетворювачі (ЧФП) широко використовуються у вимірювальній та обчислювальній техніці для генерування гармонійних сигналів та сигналів спеціальної форми, для швидкого виконання операцій множення та ділення сигналів тощо [1]. Серед інших актуальним є завдання підвищення максимальної частоти роботи синусно-косинусних ЧФП, вирішення якого дає змогу застосовувати вищу частоту квантування і збільшувати у такий спосіб точність вимірювання, а також розширювати частотний діапазон генерованих сигналів. Разом з тим, підвищення максимальної частоти роботи класичних ЧФП спричиняє зменшення їхньої розрядності, що збільшує похибку перетворення ЧФП. Це протиріччя обмежує можливості подальшого підвищення точності вимірювальних перетворювачів, побудованих із застосуванням класичного синусно-косинусного ЧФП. Для вирішення проблеми залежності максимальної частоти роботи ЧФП та його розрядності було розроблено конвеєрні структурні елементи ЧФП [2]. Максимальна частота їхньої роботи не залежить від розрядності і є значно вищою за максимальну частоту роботи класичних структурних елементів ЧФП. Це дає змогу підвищувати частоту квантування вимірювальних перетворювачів, побудованих на базі конвеєрних ЧФП і, незалежно від цього, зменшувати похибку перетворення ЧФП, нарощуючи його розрядність. Однак якщо конвеєрний ЧФП має замкнуту структуру (до таких належить, зокрема, і синусно-косинусний ЧФП), тобто має зворотні зв'язки, його похибка перетворення зростає через затримку сигналу зворотного зв'язку конвеєрною структурою. В таких випадках виникає проблема підвищення точності ЧФП. Отже, маючи за мету підвищення максимальної частоти роботи синусно-косинусного ЧФП, а також засіб досягнення цієї мети – конвеєрні структурні елементи ЧФП – необхідне дослідження точності конвеєрного синусно-косинусного ЧФП і пошук можливостей підвищення його точності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розглянемо метод і послідовність синтезу, структуру і результати аналізу класичного синусно-косинусного число-імпульсного функціонального перетворювача, побудованого на класичних структурних елементах ЧФП.

Класична структура число-імпульсного синусно-косинусного ЧФП синтезується за допомогою відомої методики структурного синтезу ЧФП [1]. ЧФП повинен за одиничними приростами аргументу відтворювати функцію:

$$y = \sin x . \quad (1)$$

Функцію (1) диференціюють:

$$dy = \cos x \cdot dx. \quad (2)$$

Далі (2) розкладають в систему рівнянь Шеннона, вводячи нові змінні для позначення проміжних функцій:

$$z = \cos x \quad (3)$$

$$dz = -\sin x \cdot dx = -y \cdot dx \quad (4)$$

$$\begin{cases} dy = z \cdot dx \\ dz = -y \cdot dx \end{cases} \quad (5)$$

Отримана у такий спосіб система (5) є системою породжуючих диференціальних рівнянь функцій (1), (3).

З (5) відповідно до теореми Шеннона випливає, що для відтворення (1), (3) достатньо двох інтеграторів, охоплених перехресними зворотними зв'язками різних знаків.

Обидва рівняння системи (5) можна реалізувати за допомогою число-імпульсних помножувачів на нагромаджувальних суматорах, з урахуванням принципу роботи яких система (5) трансформується в систему (6):

$$\begin{cases} \Delta Y = Z \cdot \Delta X / 2^n \\ \Delta Z = -Y \cdot \Delta X / 2^n \end{cases} \quad (6)$$

де n – розрядність помножувачів. Структуру, що реалізує систему (6), подано на рис. 1.

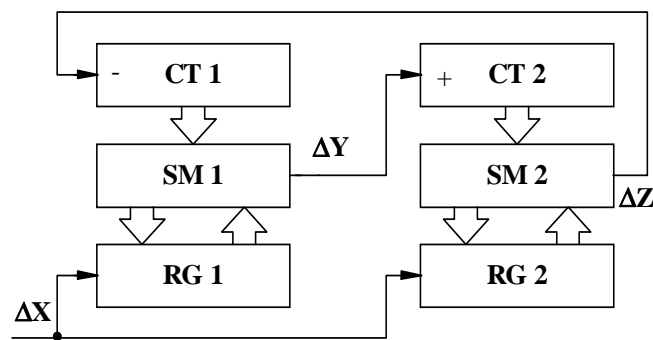


Рис. 1. Класична структура синусно-косинусного ЧІФП

Така класична структура синусно-косинусного ЧІФП за початкових умов $Y_0 = 0$; $Z_0 = 2^n$ наближено відтворює функції [1]:

$$Y = 2^n \cdot \sin(X/2^n) \quad (7)$$

$$Z = 2^n \cdot \cos(X/2^n) \quad (8)$$

Якщо далі прийняти масштаби: $X = 2^n \cdot x$; $Y = 2^n \cdot y$; $Z = 2^n \cdot z$, то структура на рис. 1 буде відтворювати функції (1), (3). Як показують відомі результати імітаційного моделювання такої структури, точність відтворення цих функцій достатньо висока – абсолютна похибка перетворення не виходить за межі:

$$-1 < \Delta_n Y, \Delta_n Z < 1, \text{ або:} \quad (9)$$

$$-1/2^n < \Delta_n y, \Delta_n z < 1/2^n \quad (10)$$

Разом з тим, відтворення функцій (1), (3) структурою на рис. 1 можливе тільки в діапазоні вхідної змінної:

$$0 \leq x < \pi/2 \quad (11)$$

У [3] з метою розширення діапазону роботи (11) класичної структури запропоновано застосовувати в її складі реверсивні число-імпульсні помножувачі. Подано також результати ґрунтовного дослідження широкодіапазонної структури синусно-косинусного ЧІФП.

Очікувалося, що вдосконалений за допомогою реверсивних структурних елементів класичний перетворювач буде відтворювати функції синуса та косинуса в безмежному діапазоні зміни аргумента:

$$-\infty < X < +\infty \quad (12)$$

Проте результати дослідження реверсивної структури [3] (рис. 2) показали, що структура і далі працює стабільно тільки в межах чверті періода. Далі в роботі структури стається збій. Причиною цього збою є переповнення та обнулення одного з лічильників результату. З метою забезпечення стабільної роботи перетворювача в діапазоні зміни аргумента (12) в роботі [3] запропоновано блокувати переповнення лічильників результату. Подальше дослідження вдосконаленої у такий спосіб реверсивної структури довело високу точність її роботи у нескінченному діапазоні зміни аргумента [3].

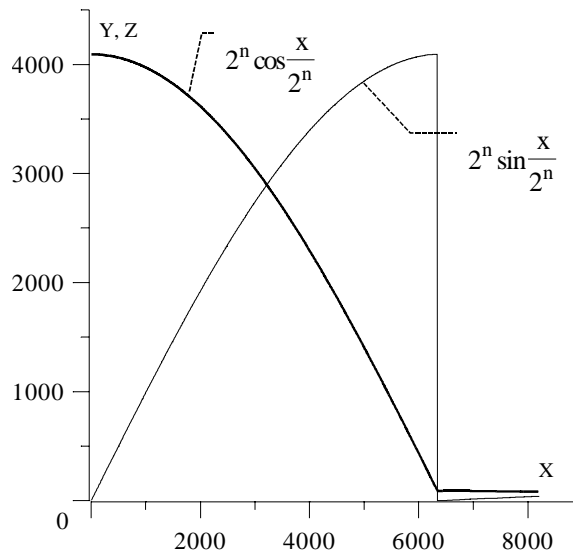


Рис. 2. Результати відтворення функцій косинуса та синуса реверсивною структурою

Мета роботи. Метою роботи є розроблення і дослідження конвеєрного число-імпульсного обчислювача функцій синуса та косинуса, який забезпечує високу частоту функціонального оброблення одиничних приростів аргумента, дослідження точності такого обчислювача і пошук способів підвищення точності.

Розроблення та дослідження конвеєрного синусно-косинусного ЧФП. У [4] для збільшення максимальної частоти роботи логарифмічного ЧФП запропоновано для його побудови застосовувати конвеєрні структурні елементи ЧФП, розроблені в роботі [2]. Такий підхід можна використати також для підвищення максимальної частоти роботи синусно-косинусного ЧФП. Разом з цим, в [2] звернено увагу на негативний вплив зворотних зв'язків конвеєрних ЧФП на точність перетворювача. Суть проблеми така. Час повнорозрядного оброблення n -розрядним конвеєрним ЧФП одного одиничного приросту аргументу є в n разів більшим за мінімальний період вхідної число-імпульсної послідовності. Це означає, що при охопленні зворотним зв'язком одного n -розрядного конвеєрного структурного елемента сигнал зворотного зв'язку буде затримано на n тактів відносно відповідного вхідного сигналу. Якщо ж зворотним зв'язком охоплено структуру з k послідовно з'єднаних структурних елементів, така затримка становитиме kn тактів. Тому в [2] рекомендується не застосовувати конвеєрні ЧФП зі зворотними зв'язками, а обмежитися розімкненими конвеєрними структурами.

Натомість в роботі [4] показано, що в деяких випадках (для деяких функцій перетворення та розрядностей структурних елементів) конвеєрні ЧФП зі зворотними зв'язками цілком відповідають критерію метрологічної доцільності. Тобто їхня похибка перетворення є сумірною з трансформованою похибкою квантування [5]. Крім того, було розроблено способи зменшення похибки, зумовленої затримкою сигналів зворотного зв'язку конвеєрними ЧФП. Такі результати було отримано завдяки застосуванню нових імітаційних моделей конвеєрних ЧФП [6], які за відсутності аналітичних методів аналізу таких перетворювачів дали змогу моделювати конвеєрні ЧФП,

достовірно прогнозувати їхні метрологічні характеристики, досліджувати способи зменшення похибки, зумовленої затримкою сигналів зворотних зв'язків.

З метою підвищення частоти роботи спробуємо реалізувати відому широкодіапазонну структуру синусно-косинусного ЧФП [3] на конвеєрних структурних елементах [2].

Розроблену структуру конвеєрного синусно-косинусного ЧФП подано на рис. 3. Структура складається з двох конвеєрних реверсивних число-імпульсних помножувачів [2], охоплених перехресними зворотними зв'язками відповідно до системи породжуючих диференціальних рівнянь (6). Один з реверсивних число-імпульсних помножувачів – КРЛЧ1 (конвеєрний реверсивний лічильник), ГМС1 (група мультиплексорів), КНС1 (конвеєрний нагромаджуючий суматор), ГК1 (група ключів), 1РГЗ, 2РГЗ (реєстри зсуву), а також логічні елементи "АБО", "СУМА ЗА MOD2" – відтворює друге рівняння системи (6). Другий реверсивний число-імпульсний помножувач – КРЛЧ2, ГМС2, КНС2, ГК2, 3РГЗ, 4РГЗ, а також логічні елементи "АБО", "СУМА ЗА MOD2" – відтворює перше рівняння системи (6). Логічний елемент "НЕ" забезпечує зміну знака приростів Z (знак мінус в другому рівнянні (6)). В одному з реверсивних конвеєрних лічильників – КРЛЧ1 – нагромаджується значення синуса, в іншому – КРЛЧ2-косинуса, відповідно до (7), (8). У лічильниках КРЛЧ1, КРЛЧ2 має бути заблоковане переповнення. Перейдемо до аналізу показників роботи розробленої структури.

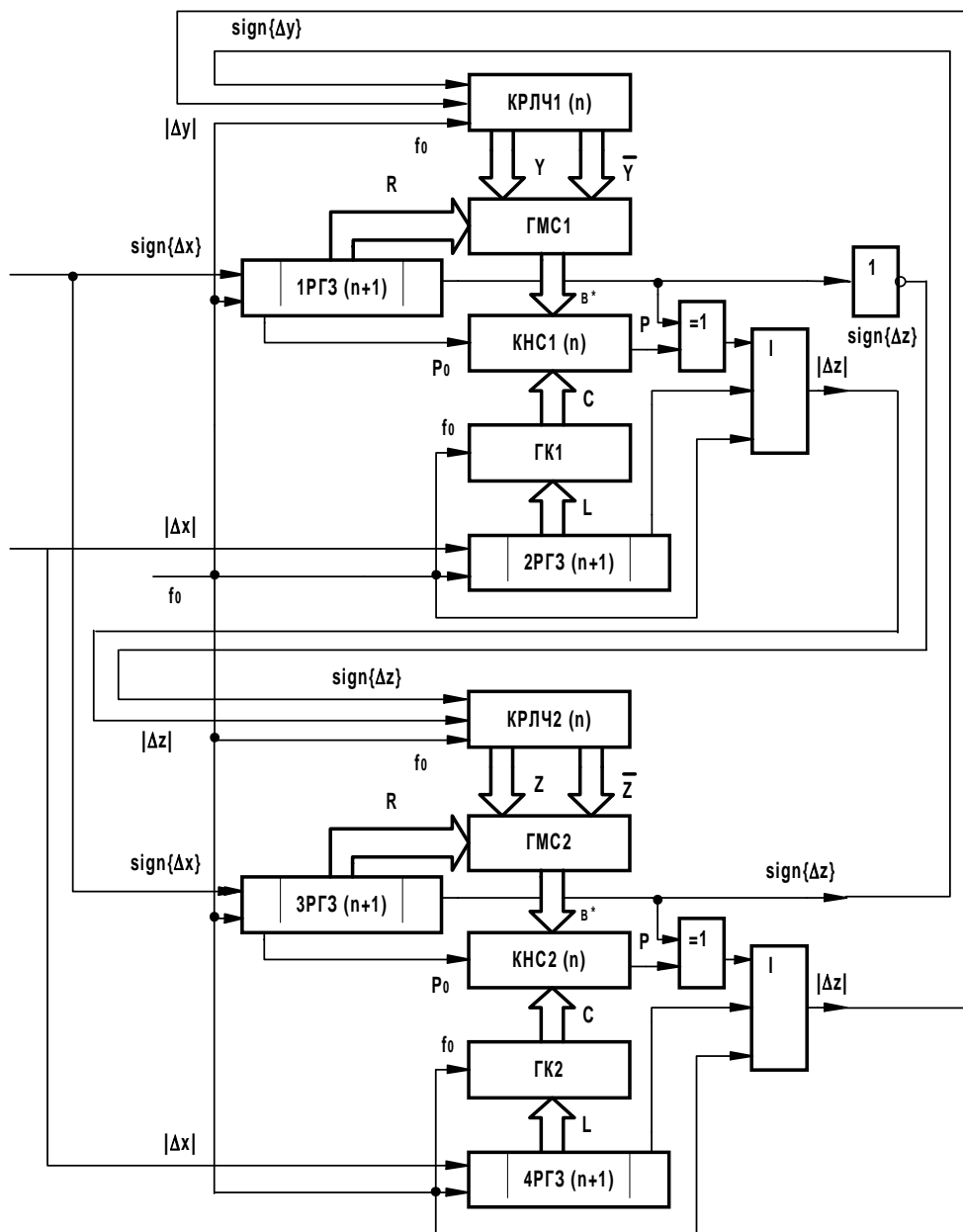


Рис. 3. Структурна схема конвеєрного широкодіапазонного синусно-косинусного ЧФП

Передусім проаналізуємо діапазон перетворення розробленої структури (рис. 3). Оскільки структура на рис. 3 побудована на основі структури широкодіапазонного синусно-косинусного ЧФП [3], діапазон її роботи (12) відповідає діапазону роботи базової структури, але тільки за умови блокування переповнень лічильників КРЛЧ1 та КРЛЧ2.

Перейдемо тепер до аналізу швидкодії розробленої структури, причому будемо аналізувати максимальну частоту її роботи. Другий критерій швидкодії – час перетворення – не аналізуємо, оскільки число-імпульсні структури працюють в реальному масштабі часу і мають скінченну постійну затримку формування результату. При імітаційному моделюванні ми вважаємо, що час формування результату дорівнює нулеві. Тобто ми проектуємо скінченну затримку формування результату на точність розробленої структури.

Відомо [1], що максимальна частота роботи класичної структури (побудованої на неконвеєрних структурних елементах) обернено пропорційна до часу послідовного спрацювання всіх n -розрядних нагромаджуючих суматорів структури, увімкнених послідовно. В розробленій структурі застосовано конвеєрні структурні елементи. Як відомо [2], максимальна частота їхньої роботи не залежить від розрядності і дорівнює:

$$f_m = f_{0\max} = \frac{1}{t_T + t_{1CM}}, \quad (13)$$

де t_T – час спрацювання тригера регістра; t_{1CM} – час спрацювання однорозрядного суматора.

Очевидно, що максимальна частота роботи розробленої конвеєрної структури синусно-косинусного ЧФП, яка визначається виразом (13), є значно вищою за максимальну частоту роботи класичних неконвеєрних структур аналогічного призначення. Перейдемо тепер до оцінки точності розробленої конвеєрної структури синусно-косинусного ЧФП.

Як відомо, сьогодні не існує аналітичних методик аналізу точності число-імпульсних структур зі зворотними зв'язками. Тому для оцінки точності застосовують імітаційно-математичне моделювання. З метою дослідження точності розробленої структури було розроблено її імітаційну модель із застосуванням імітаційно-математичних моделей структурних елементів конвеєрних ЧФП, запропонованих в [6]. За допомогою імітаційної моделі досліджувалась розроблена конвеєрна структура синусно-косинусного ЧФП за різних напрямків зміни аргумента. Фрагмент результатів імітаційного моделювання розробленої конвеєрної структури синусно-косинусного ЧФП подано на рис. 4. Досліджувався 12-розрядний варіант структури ($2^n=4096$). Моделювання здійснювалося в такому діапазоні зміни значень аргумента:

$$0 < X < 100 \cdot 2^n \quad (14)$$

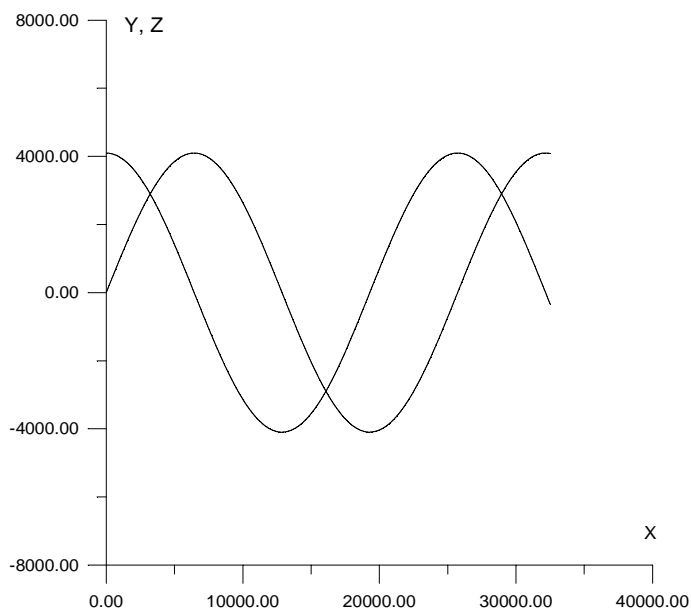


Рис. 4. Фрагмент результатів роботи моделі конвеєрної структури синусно-косинусного ЧФП

Подані результати показують, що розроблена структура справді відтворює функції синуса та косинуса відповідно до рівнянь (7), (8). Для оцінки точності при моделюванні визначалися абсолютні похибки перетворення структури. Структура моделювалася за різних значень початкових значень (зсувів) у регістрах та лічильниках з метою визначення оптимальних початкових даних, за яких розроблена структура характеризується найменшими значеннями похибки перетворення.

У таблиці подано максимальні значення абсолютних похибок перетворення структури за різних значень початкового коду в регістрах та лічильниках результату.

Результати дослідження структури за різних початкових даних

Діапазон	Поч. код в регістрах	Поч. код в лічильниках	Похибки синуса	Похибки косинуса
$0 < X < 5 \cdot 2^n$	РГсин.=0 РГкос.=0	ЛЧсин.=0 ЛЧкос.=0	$\Delta_{SIN \max} \approx 3,04$ $\Delta_{SIN \min} \approx -2,58$	$\Delta_{COS \max} \approx 2,83$ $\Delta_{COS \min} \approx -2,39$
$0 < X < 15 \cdot 2^n$	РГсин.=0 РГкос.=0	ЛЧсин.=0 ЛЧкос.=0	$\Delta_{SIN \max} \approx 3,05$ $\Delta_{SIN \min} \approx -3,06$	$\Delta_{COS \max} \approx 3,24$ $\Delta_{COS \min} \approx -3,00$
$0 < X < 50 \cdot 2^n$	РГсин.=0 РГкос.=0	ЛЧсин.=0 ЛЧкос.=0	$\Delta_{SIN \max} \approx 3,9$ $\Delta_{SIN \min} \approx -3,86$	$\Delta_{COS \max} \approx 4,03$ $\Delta_{COS \min} \approx -3,8$
$0 < X < 100 \cdot 2^n$	РГсин.=0 РГкос.=0	ЛЧсин.=0 ЛЧкос.=0	$\Delta_{SIN \max} \approx 5,34$ $\Delta_{SIN \min} \approx -5,55$	$\Delta_{COS \max} \approx 5,42$ $\Delta_{COS \min} \approx -5,4$
$0 < X < 100 \cdot 2^n$	РГсин.= 2^{n-1} РГкос.= 2^{n-1}	ЛЧсин.=0 ЛЧкос.=0	$\Delta_{SIN \max} \approx 5,28$ $\Delta_{SIN \min} \approx -5,09$	$\Delta_{COS \max} \approx 5,24$ $\Delta_{COS \min} \approx -5,25$
$0 < X < 100 \cdot 2^n$	РГсин.= 2^n РГкос.= 2^n	ЛЧсин.=0 ЛЧкос.=0	$\Delta_{SIN \max} \approx 4,45$ $\Delta_{SIN \min} \approx -4,59$	$\Delta_{COS \max} \approx 4,44$ $\Delta_{COS \min} \approx -4,4$
$0 < X < 100 \cdot 2^n$	РГсин.=0 РГкос.=0	ЛЧсин.=3 ЛЧкос.= 2^n-3	$\Delta_{SIN \max} \approx 3,22$ $\Delta_{SIN \min} \approx -3,26$	$\Delta_{COS \max} \approx 3,28$ $\Delta_{COS \min} \approx -3,08$

Аналізуючи наведені в таблиці дані, доходимо висновку, що початковий зсув результатів на частки одиниці молодшого розряду (тобто в межах вмісту регістрів нагромаджуючих суматорів) не дає достатнього ефекту, хоча й вдається досягти деякого покращання точності. З таблиці видно, що кращою точністю характеризується структура, в якій є початковий зсув результатів перетворення на три одиниці молодшого розряду. При таких початкових даних абсолютна похибка перетворення структури близька до цих самих трьох одиниць молодшого розряду навіть при відпрацюванні ста періодів результуючої функції. З іншого боку, аналізуючи динаміку підвищення точності структури за допомогою підбору початкових зсувів результату (таблиця) доходимо висновку, що із збільшенням зсуву похибки зменшуються. Проте очевидно, що недоцільним є збільшення зсуву понад три одиниці, адже тоді початкова похибка буде більшою за поточні похибки обчислення функцій синуса та косинуса. Отже, оптимальним є початковий зсув результатів саме на три одиниці молодшого розряду.

Отже, можна стверджувати, що збільшення абсолютної похибки перетворення конвеєрної структури виявилось не таким істотним, як очікувалося. Хоч вихідні прирости результату (сигнали зворотного зв'язку) затримуються на дванадцять тактів, абсолютна похибка перетворення фактично лежить в межах трьох одиниць молодшого розряду, що всього вдвічі гірше ніж в класичній широкодіапазонній структурі синусно-косинусного ЧФП. Разом з тим, вдалося значно підвищити максимальну частоту роботи структури, що призводить до відповідного зменшення похибки квантування. Тобто загалом можна сподіватися на підвищення точності перетворювачів, побудованих із застосуванням розробленої конвеєрної структури синусно-косинусного ЧФП.

На рис. 5 подано графік абсолютної похибки обчислення конвеєрною структурою функції синуса, а на рис. 6 – функції косинуса (відображено фрагмент результату).

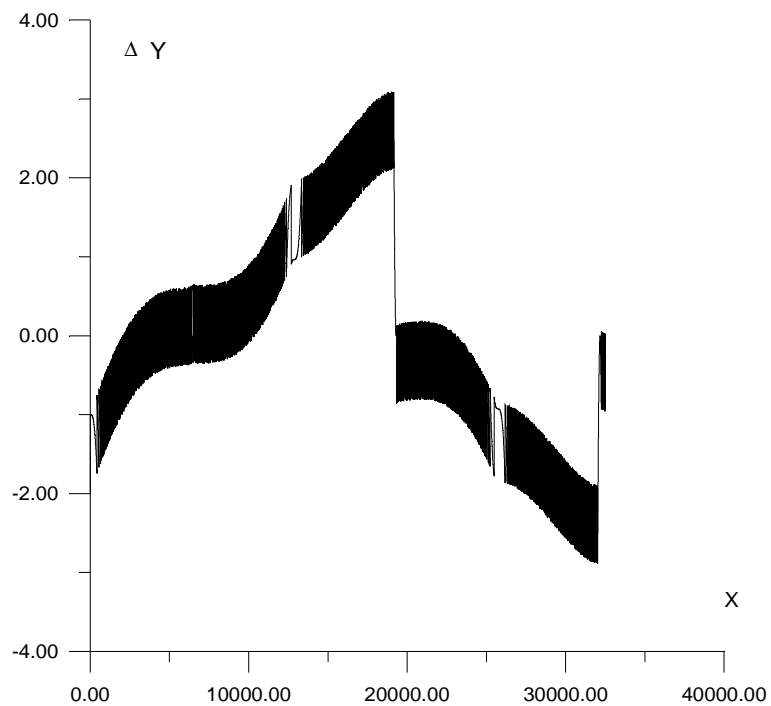


Рис. 5. Графік абсолютної похибки відтворення функції синуса розробленою конвеєрною структурою

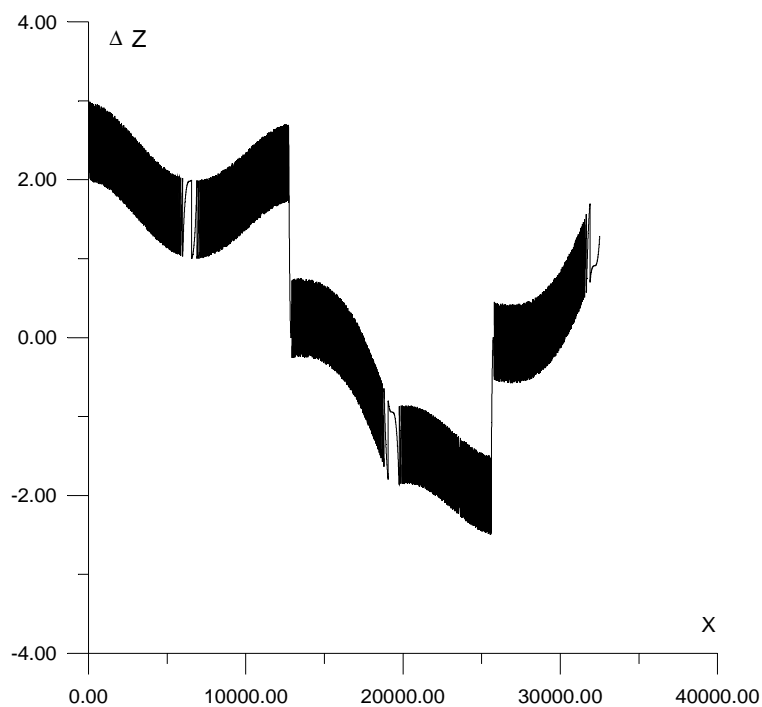


Рис. 6. Графік абсолютної похибки відтворення функції косинуса розробленою конвеєрною структурою

Подальше підвищення точності конвеєрної структури синусно-косинусного ЧФП можливе за допомогою таблично-алгоритмічного методу. Його суть – періодичне коригування результату перетворення за допомогою точних значень результату, які зберігаються в блоці пам'яті.

Висновки. Тригонометричні функціональні перетворювачі широко застосовують у вимірвальній та обчислювальній галузях. При їх застосуванні для оброблення величин, поданих у вигляді частоти імпульсної послідовності або число-імпульсного коду, доцільно застосовувати число-імпульсні функціональні перетворювачі, які дають змогу здійснювати функціональне перетворення у ході формування паралельного коду аргумента перетворення. Разом з тим, у разі застосування ЧФП у складі інтелектуальних вимірвальних перетворювачів, генеруючих пристроїв, виникає конфлікт між намаганнями збільшити максимальну частоту роботи ЧФП і зберегти або підвищити його точність. В основі конфлікту – пряма залежність похибки квантування перетворювача й обернена залежність похибки перетворення ЧФП від його розрядності. Одним із способів усунення залежності похибки квантування від розрядності ЧФП є реалізація останнього на конвеєрних структурних елементах ЧФП. Однак конвеєрні ЧФП із зворотними зв'язками, до яких належить і синусно-косинусний ЧФП, характеризуються більшою, ніж класичні структури ЧФП, похибкою перетворення. Тому для таких структур актуальним є пошук способів зменшення похибки перетворення. Одним з ефективних способів зменшення похибки перетворення конвеєрного синусно-косинусного ЧФП є його імітаційне моделювання з метою пошуку оптимальних щодо точності початкових значень параметрів структури.

1. Дудикевич В.Б. Число-імпульсні функціональні перетворювачі [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. / Дудикевич В.Б. – Львів, 1991. 2. Горпенюк А.Я. Принципи побудови конвеєрних базових вузлів число-імпульсних вимірвальних перетворювачів / А.Я. Горпенюк // Контроль і управління в технічних системах (КУТС-97). Книга за матеріалами конференції: Том 2. – "Універсум-Вінниця". – 1997. – С. 137–140. 3. Горпенюк А.Я. Широкодіапазонний синусно-косинусний функціональний перетворювач / А.Я. Горпенюк., В.Б. Дудикевич, А.Е. Лагун // Вісник ДУ "Львівська політехніка" – "Радіоелектроніка та телекомунікації". – 2000. – № 387. – С. 420–424. 4. Горпенюк А.Я. Логарифмічний конвеєрний число-імпульсний функціональний перетворювач / А.Я. Горпенюк, В.Б. Дудикевич, Н.М. Лужецька // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Вимірвальна техніка та метрологія". – 2006. – № 66. – С. 142–149. 5. Дудикевич В.Б. Оцінка сумісності число-імпульсних функціональних перетворювачів з пристроєм для квантування / В.Б. Дудикевич, В.М. Максимович // Вісник ДУ "Львівська політехніка" – "Автоматика, вимірювання та керування". – 1994. – № 283. – С. 30–34. 6. Горпенюк А.Я. Імітаційне моделювання конвеєрних число-імпульсних функціональних перетворювачів / А.Я. Горпенюк, В.Б. Дудикевич, Н.М. Лужецька // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" – "Автоматика, вимірювання та керування". – 2005. – № 530. – С. 66–75.