

## ЛОГАРИФМІЧНИЙ КОНВЕЄРНИЙ ЧИСЛО-ІМПУЛЬСНИЙ ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

© Горпенюк Андрій, Дудикевич Валерій, Лужецька Наталія, 2006

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматики та телемеханіки,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

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

*Приведены результаты синтеза и исследования конвейерной структуры логарифмического число-импульсного функционального преобразователя. Показано, что максимальная частота работы такой структуры значительно больше максимальной частоты работы классической структуры. Предложены способы улучшения точности конвейерной структуры логарифмического преобразователя.*

*The results of conveyor structure of logarithmic 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 logarithmic transformer exactness improvement.*

**Постановка проблеми.** Логарифмічні число-імпульсні функціональні перетворювачі (ЧІФП) широко використовують у вимірювальній та обчислювальній техніці для масштабування сигналів, для швидкого виконання операцій множення та ділення сигналів тощо [1]. Оскільки такі перетворювачі часто застосовують у складі вимірювальної техніки, актуальною є задача підвищення максимальної частоти їхньої роботи, розв'язання якої дає змогу застосувати вищу частоту квантування і збільшувати точність вимірювання. Разом з тим, підвищення максимальної частоти роботи класичних ЧІФП спричиняє зменшення їхньої розрядності, що погіршує похибку перетворення самого функціонального перетворювача. Ця суперечність обмежує можливості подальшого підвищення точності вимірювальних перетворювачів, побудованих із застосуванням класичного логарифмічного ЧІФП. Для вирішення проблеми залежності максимальної частоти роботи ЧІФП та його розрядності було розроблено конвеєрні структурні елементи ЧІФП [2]. Максимальна частота роботи таких структурних елементів не залежить від їхньої розрядності і є значно вищою за максимальну час-

тоту роботи класичних структурних елементів ЧІФП. Це дає змогу підвищувати частоту квантування вимірювальних перетворювачів, побудованих на базі конвеєрних ЧІФП і, незалежно від цього, зменшувати похибку перетворення ЧІФП, нарощуючи його розрядність. Однак якщо конвеєрний ЧІФП має замкнуту структуру (до таких належить зокрема, і логарифмічний ЧІФП), тобто має зворотні зв'язки, його похибка перетворення зростає через затримку сигналу зворотного зв'язку порозрядною конвеєрною структурою. В таких випадках виникає проблема підвищення точності ЧІФП. Отже, маючи за мету підвищення максимальної частоти роботи логарифмічного ЧІФП, а також засіб досягнення цієї мети – конвеєрні структурні елементи ЧІФП – необхідне дослідження точності конвеєрного логарифмічного ЧІФП і пошук способів підвищення його точності.

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

Для того, щоб синтезувати структуру логарифмічного ЧФП, застосовують відому методику структурного синтезу ЧФП [1]. Розглянемо зміст такого синтезу.

Нехай необхідно відтворити за допомогою ЧФП функцію:

$$y = \ln x \quad (1)$$

(1) диференціюють для того, щоб отримати диференціальне рівняння, яке породжує функціональну залежність (1):

$$dy = \frac{1}{x} dx \quad (2)$$

За необхідності задіюють етап декомпозиції структурного синтезу. Оскільки рівняння (2) просте, тобто може бути безпосередньо (без поділу на систему простіших рівнянь) промодельоване відомим число-імпульсним структурним елементом (дільником), немає необхідності в етапі декомпозиції. Отже, для моделювання рівняння (2) використовують число-імпульсний дільник з від'ємним зворотним зв'язком. Його рівняння роботи відрізняється від (2) і виглядає так [1]:

$$dy = \frac{2^n}{x} dx \quad (3)$$

де  $n$  – розрядність дільника. Рівняння (3) справедливе для діапазону зміни аргументу:

$$2^n < x < 2^{(n+1)}$$

Отже, число-імпульсна структура, яка наближено відтворює функцію (1) повинна містити один число-імпульсний дільник, а також лічильник результату перетворення, який інтегрує прирости  $y$ . Така структура працює з одиничними приростами аргументу, проміжних величин і результату. Її роботу наближено описує рівняння:

$$\Delta y = \frac{2^n}{x} \Delta x \quad (4)$$

Класичну число-імпульсну структуру для наближеного відтворення логарифмічної функції подано на рис. 1.

Структура містить лічильник підінтегральної функції ЛЧ, комбінаційний суматор СМ, регістр РГ. На цих трьох елементах побудовано число-імпульсний помножувач. За допомогою схеми віднімання імпульсних послідовностей СВ на основі цього помножувача реалізовано число-імпульсний дільник [1]. Крім того, у схемі є лічильник приростів результату перетворення ЛЧР.

Виведемо функцію перетворення, яку наближено відтворює структура. Вона подана на рис. 1.

Робота цієї структури наближено описується рівнянням (3). В лічильнику ЛЧР зберігається результат. Він є результатом інтегрування приростів  $\Delta y$ . Проінтегруємо рівняння (3):

$$y - y_0 = 2^n (\ln x - \ln x_0) = 2^n \ln \frac{x}{x_0} \quad (5)$$

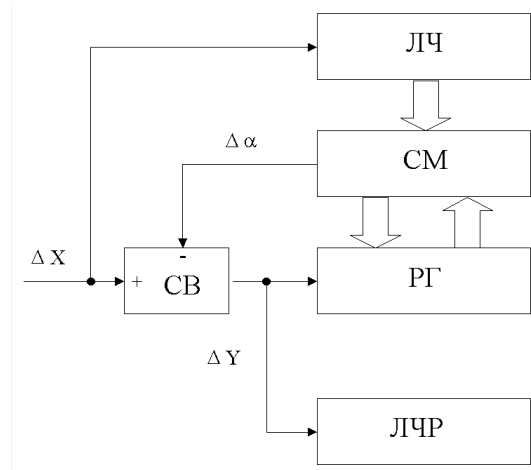


Рис. 1. Структурна схема логарифмічного ЧФП

Відомо: для того, щоб число-імпульсний дільник зі схемою віднімання відтворював рівняння (4), необхідно подавати на суматор СМ з лічильника ЛЧ код, який на  $2^n$  менший за значення підінтегральної функції [1]. Тобто щоб структура на рис. 1 почала працювати, нам необхідно пропустити перші  $2^n$  імпульсів послідовності  $x$  – тобто дочекатися одного переповнення лічильника ЛЧ. А це означає, що

$$x_0 = 2^n \quad (6)$$

Якщо прийняти:

$$y_0 = 0 \quad (7)$$

з урахуванням на (5) отримаємо:

$$y = 2^n \ln \frac{x}{2^n} \quad (8)$$

Саме таку функцію наближено відтворює класична структура логарифмічного ЧФП (рис. 1).

Перейдемо тепер до аналізу відомих результатів дослідження точності розглянутої структури.

Для дослідження точності розглянутої базової число-імпульсної структури логарифмічного функціонального перетворювача застосовують її імітаційне моделювання. За допомогою такого моделювання досліджують абсолютні похибки перетворення для  $n$ -розрядного пристрою. Результати дослідження 12-розрядного варіанта структури подано на рис. 2 у

вигляді графіка залежності абсолютної похибки перетворення від кількості вхідних імпульсів  $x$ .

З графіка на рис. 2 видно, що значення абсолютної похибки не перевищують одиниці молодшого розряду. Відомо [1], що підбиранням оптимальних початкових даних (числа в регістрі РГ) можна досягти того, що значення абсолютної похибки перетворення структури на рис. 2 не буде перевищувати 0,5 одиниці молодшого розряду результату перетворення.

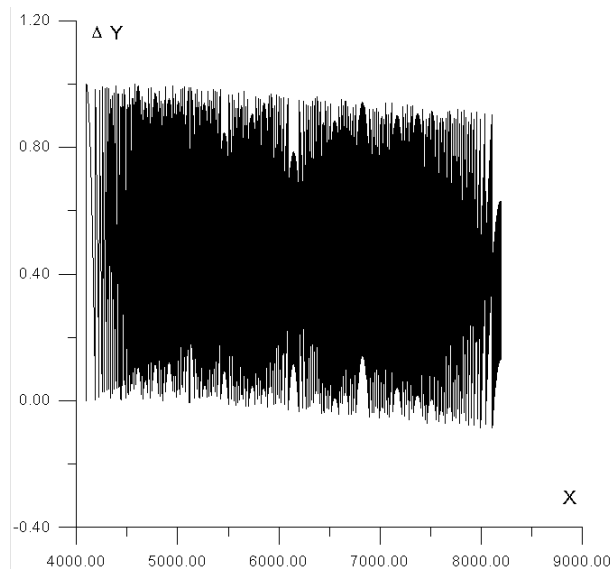


Рис. 2. Графік залежності абсолютної похибки перетворення структури логарифмічного ЧФП від значення вхідного коду

Проаналізуємо тепер максимальну частоту роботи класичної структури логарифмічного ЧФП, від значення якої прямо залежить похибка квантування вимірювальних перетворювачів, побудованих із застосуванням такого перетворювача. Як показано в [2], максимальна частота роботи класичного логарифмічного ЧФП залежить від часу спрацювання  $n$ -розрядного нагромаджувального суматора (рис. 1) і приблизно дорівнює:

$$f_m \approx \frac{1}{t_{CM(n)}}. \quad (9)$$

Очевидно, що час спрацювання  $n$ -розрядного нагромаджувального суматора залежить від його розрядності. Тобто нарощення розрядності суматора зменшує максимальну частоту роботи структури і призводить до збільшення похибки квантування. З іншого боку, нарощення розрядності структури є одним із способів зменшення похибки перетворення ЧФП. Цю суперечність можна подолати, позба-

вившись залежності максимальної частоти роботи число-імпульсної структури від її розрядності. У [2] запропоновано способи вирішення цієї проблеми. Зокрема, розроблено конвеєрні структурні елементи ЧФП – помножувачі та дільники – максимальна частота роботи яких значно вища за максимальну частоту роботи класичних структурних елементів і не залежить від розрядності конвеєрного структурного елемента. Разом з тим, у [2] звернено увагу на збільшену похибку перетворення конвеєрних структур з імпульсними зворотними зв'язками порівняно із класичними структурами. Класична структура логарифмічного ЧФП (рис. 1) також містить імпульсний зворотний зв'язок. Тому, вирішуючи проблему підвищення швидкодії за допомогою її реалізації на конвеєрних структурних елементах ЧФП, необхідно вживати заходів для зменшення її похибки перетворення.

**Мета роботи.** Метою роботи є розроблення і дослідження конвеєрного число-імпульсного відтворювача логарифмічної функції, який забезпечує вищу швидкодію функціонального оброблення одиничних приростів аргументу. Подано також результати пошуку способів зменшення похибки перетворення такої структури. Зокрема, наведено результати дослідження таблично-алгоритмічної конвеєрної структури логарифмічного ЧФП, яка забезпечує кращу точність перетворення.

**Проблема зворотних зв'язків в конвеєрних ЧФП.** В [2] звернено увагу на проблему реалізації зворотних зв'язків в конвеєрних ЧФП. Розглянемо суть проблеми. 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 у разі охоплення зворотним зв'язком одного  $n$ -розрядного конвеєрного структурного елемента сигнал зворотного зв'язку буде затримано на  $n$  тактів стосовно до відповідного вхідного сигналу. Якщо ж зворотним зв'язком охоплено структуру з  $k$  послідовно з'єднаних структурних елементів, така затримка становитиме  $kn$  тактів. Затримка сигналу зворотного зв'язку призводить до істотного зростання похибки перетворення конвеєрної число-імпульсної структури зі зворотними зв'язками. Тому в [2] рекомендується не застосовувати конвеєрні ЧФП зі зворотними зв'язками, а обмежитися розімкненими конвеєрними структурами.

На противагу рекомендаціям [2] варто відзначити, що подальші дослідження конвеєрних ЧФП зі зворотними зв'язками довели перспективність їхнього розроблення та дослідження. Зокрема, було показано, що іноді (для деяких функцій перетворення та розрядностей структурних елементів) конвеєрні ЧФП зі зворотними зв'язками цілком відповідають критерію метрологічної доцільності [3]. Тобто їхня похибка перетворення є сумірною з трансформованою похибкою квантування. 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 [4], 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.

**Розроблення та дослідження конвеєрного логарифмічного ЧФП та способів покращання його точності.** Метою роботи є підвищення швидкодії логарифмічного число-імпульсного функціонального перетворювача та розроблення напрямів покращання його точності. Вище було розглянуто число-імпульсну структуру, яка потенційно дає змогу досягти поставленої мети за умови її реалізації на конвеєрних структурних елементах, запропонованих в [2].

Спробуємо реалізувати відому структуру логарифмічного число-імпульсного функціонального перетворювача (рис. 1) на конвеєрних структурних елементах.

Структура на рис. 1 містить один число-імпульсний дільник, побудований на лічильнику підінтегральної функції ЛЧ, лічильнику результату ЛЧР, комбінаційному суматорі СМ, регістрі РГ та схемі віднімання СВ. Всі ці елементи можна реалізувати як конвеєрні за структурами, запропонованими в [2].

Зважаючи на розглянуті принципи побудови і на роботу [2], розроблено структурну схему конвеєрного логарифмічного число-імпульсного функціонального перетворювача. Такий конвеєрний функціональний перетворювач характеризується значно вищою швидкодією, зокрема максимальною частотою роботи, завдяки застосуванню порозрядної конвеєрної процедури оброблення одиничних приростів

аргументу логарифмічної функції.

Розроблену структурну схему подано на рис. 3.

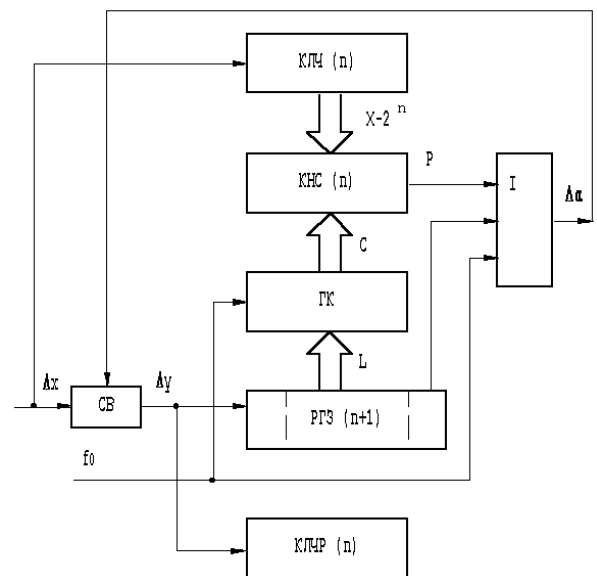


Рис. 3. Структурна схема конвеєрного логарифмічного ЧФП

У розробленій структурі  $n$ -розрядний конвеєрний лічильник КЛЧ інтегрує прирости  $\Delta X$  аргументу логарифмічної функції (тобто прирости функції, оберненої до підінтегральної). Регістр зсуву РГЗ, група ключів ГК і конвеєрний нагромаджувальний суматор КНС утворюють конвеєрний число-імпульсний помножувач, який формує імпульсну послідовність зворотного зв'язку  $\Delta\alpha$  відповідно до принципу роботи число-імпульсного дільника. Схема віднімання СВ віднімає від вхідної послідовності  $\Delta X$  приростів аргументу послідовність приростів  $\Delta\alpha$  зворотного зв'язку, формуючи у такий спосіб послідовність приростів  $\Delta Y$  результату перетворення відповідно до принципу роботи число-імпульсного дільника [1]. Одиничні прирости  $\Delta Y$  результату перетворення підраховує (інтегрує) конвеєрний лічильник результату КЛЧР.

Відповідно до структури на рис. 3 розроблено функціональну схему конвеєрного логарифмічного число-імпульсного функціонального перетворювача з використанням функціональних схем конвеєрних структурних елементів ЧФП, запропонованих у [2]. Розроблену функціональну схему подано на рис. 4 (4-розрядний варіант структури).

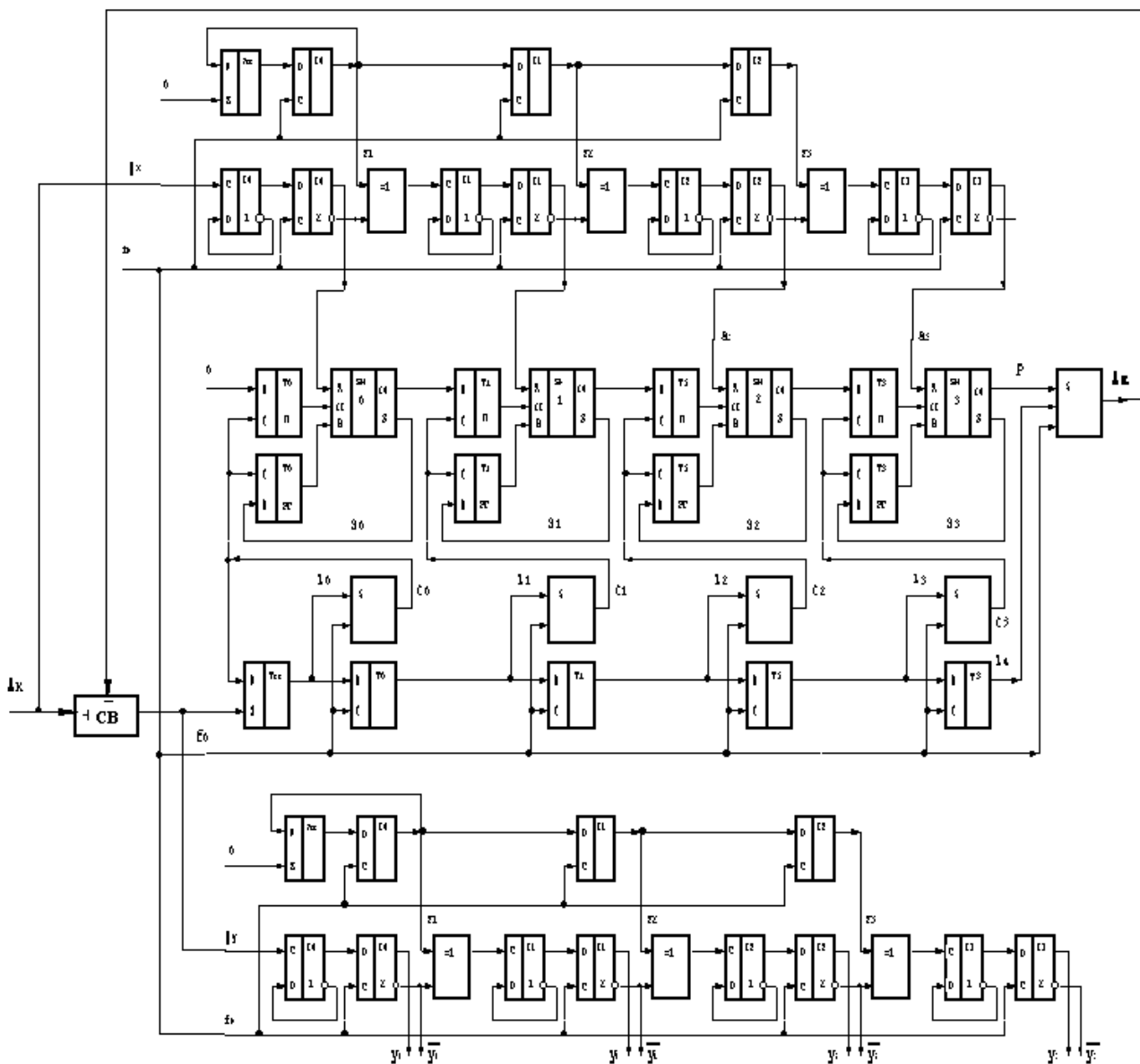


Рис. 4. Функціональна схема конверсного логарифмічного ЧІФП

Проаналізуємо діапазон перетворення розробленої структури (рис. 3, рис. 4). Оскільки у структуру на рис. 3 входить лічильник для підрахунку одиничних приростів аргументу  $\Delta x$  і вона не містить відомих засобів для розширення діапазону перетворення [1], права межа діапазону перетворення розробленої структури визначається максимальною місткістю цього лічильника. Ліва межа діапазону зміни аргументу, як впливає з принципу роботи число-імпульсного дільника з від’ємним зворотним зв’язком, обмежується числом  $2^n$  (що відповідає одному переповненню лічильника КЛЧ). Звідси робимо висновок, що права межа діапазону перет-

ворення  $2^{(n+1)}$  (що відповідає другому переповненню КЛЧ). Отже:

$$2^n < X < 2^{(n+1)}. \tag{10}$$

Перейдемо тепер до аналізу швидкодії розробленої структури. Причому будемо аналізувати максимальну частоту її роботи. Другий критерій швидкодії – час перетворення – аналізувати не будемо, оскільки число-імпульсні структури працюють у реальному масштабі часу і тому їхній час перетворення визначає тільки фіксовану затримку формування результату перетворення для кожного з аргументів заданої (у нас логарифмічної) функції. Щодо максимальної частоти роботи, то цей критерій важливіший. Це

пояснюється тим, що ЧІФП часто застосовують в інтелектуальних засобах вимірювання для первинної функціональної обробки вимірювальної інформації. В таких засобах часто прирости аргументу – це прирости величини, якою квантується вимірювана величина. Тому, підвищуючи частоту надходження цих приростів, ми тим самим покращуємо точність перетворювача, оскільки зменшуємо похибку квантування.

Відомо, що максимальна частота спрацювання класичної число-імпульсної структури (побудованої на класичних структурних елементах) обернено пропорційна до часу послідовного спрацювання всіх  $n$ -розрядних нагромаджувальних суматорів структури, увімкнених послідовно. Ми в розробленій структурі застосували конвеєрні структурні елементи. Як відомо [2], їхня максимальна частота роботи не залежить від розрядності і дорівнює:

$$f_m = f_{0max} = \frac{1}{t_T + t_{1CM}}, \quad (11)$$

де  $t_T$  – час спрацювання одного тригера регістра,  $t_{1CM}$  – час спрацювання одnorozрядного суматора. Очевидно, що:

$$t_T > t_{1CM}. \quad (12)$$

Тому:

$$f_m > \frac{1}{2t_T}. \quad (13)$$

Прийmemo:

$$f_0 > \frac{1}{t_T} \quad (14)$$

максимальна частота роботи вибраної елементної бази. Тоді максимальна частота роботи розробленої структури конвеєрного логарифмічного число-імпульсного функціонального перетворювача відповідно до (13) і з урахуванням (14) не залежить від розрядності і дорівнює:

$$f_m \approx \frac{f_0}{2}. \quad (15)$$

Очевидно, що максимальна частота роботи розробленої конвеєрної структури, яка визначається виразом (15), є значно вищою за максимальну частоту роботи (9) класичних структур аналогічного призначення.

Перейдемо тепер до оцінки точності розробленої конвеєрної структури логарифмічного число-імпульсного функціонального перетворювача.

Як відомо, сьогодні не існує аналітичних методик аналізу точності число-імпульсних структур зі зворотними зв'язками. Тому для оцінки точності

таких структур застосовують імітаційно-математичне моделювання. Похибка перетворення розробленої структури також визначалася за допомогою моделювання цих структур на ЕОМ. Принципи і алгоритми моделювання конвеєрних число-імпульсних структурних елементів та структур загалом детально розглянуто в роботі [4]. Саме ці алгоритми було застосовано для дослідження розробленої структури конвеєрного логарифмічного ЧІФП.

Результати моделювання розробленої конвеєрної структури логарифмічного ЧІФП подано на рис. 5. Ці результати показують, що розроблена структура характеризується більшою абсолютною похибкою перетворення (в результатах похибку перетворення подано в одиницях молодшого цілого розряду результату перетворення), ніж класична структура аналогічного призначення. Це пояснюється тим, що імпульси зворотного зв'язку розроблена конвеєрна структура затримує на час, значно більший (в  $n$  разів, де  $n$ -розрядність структури) за період вхідної імпульсної послідовності. Разом з тим, з графіка на рис. 5 видно, що абсолютна похибка розробленої структури є значно меншою за значення аргументу. Тобто відносна похибка структури залишається незначною. Недоліком є зростання значення абсолютної похибки із зростанням значення аргументу.

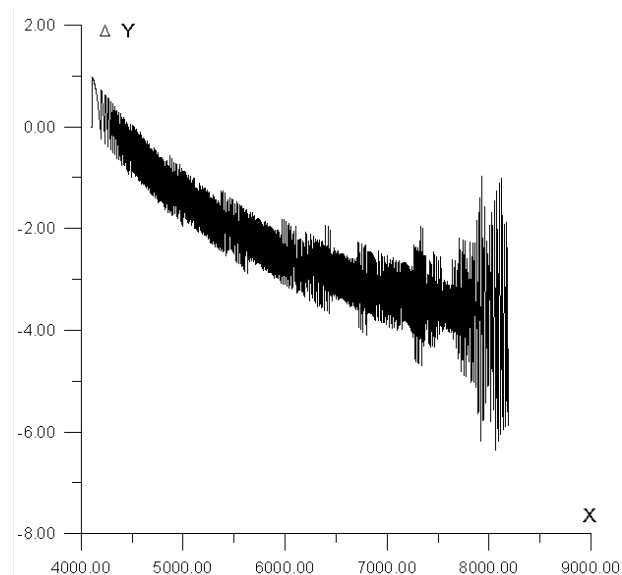


Рис. 5. Результати імітаційного моделювання конвеєрної структури логарифмічного ЧІФП

Одним із способів покращання точності розробленої структури може бути застосування таблично алгоритмічного методу. Його суть – періодичне

коригування результату перетворення за допомогою точних значень результату, які зберігаються в блоці пам'яті. Такий підхід було випробувано і реалізовано за допомогою імітаційної моделі розробленої структури.

Результати імітаційного моделювання конвеєрної структури логарифмічного ЧФП з періодичним коригуванням результату перетворення (рис. 6) є кращими за результати, подані на рис. 5. Разом з тим, не можна стверджувати, що вдалося досягти значного покращання точності розробленої структури. Точність істотно покращана на більшій частині діапазону зміни значення аргументу. Однак наприкінці діапазону похибка стрімко зростає, незважаючи на коригування результату перетворення. Це пояснюється зростанням коду в КЛЧ розробленої структури (рис. 3) і пов'язаним з цим зростанням кількості затриманих імпульсів зворотного зв'язку.

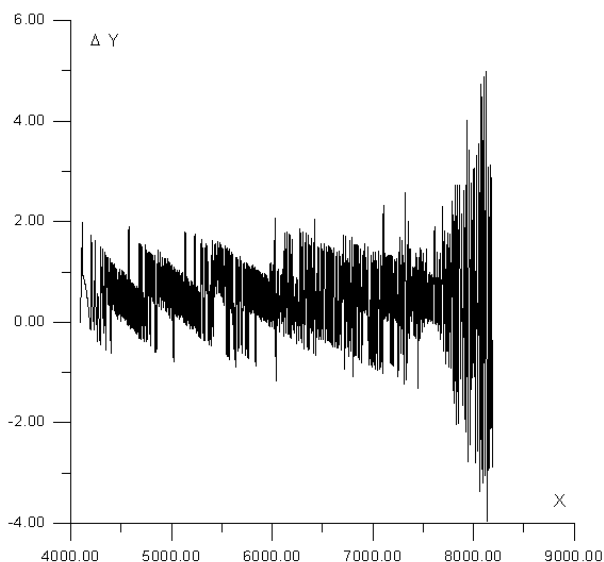


Рис.6. Результати моделювання таблично-алгоритмічного конвеєрного логарифмічного ЧФП

Отже, доводиться визнати, що точність конвеєрної структури логарифмічного число-імпульсного функціонального перетворювача є гіршою за точність класичної структури. Однак за умови застосування розробленої структури у складі вимірювальних перетворювачів втрата точності логарифмічного функціонального перетворювача компенсується зменшенням похибки квантування, зумовленим зростанням максимальної частоти роботи вимірювального перетворювача.

Отже, основна рекомендація для покращання точності конвеєрної структури логарифмічного чис-

ло-імпульсного функціонального перетворювача – застосування динамічного коригування її роботи [5].

Ще одним способом покращання точності є попереднє визначення імпульсів зворотного зв'язку за допомогою імітаційного моделювання і подання їх на вхід конвеєрної структури “з випередженням”. До того ж можна зберігати не всі імпульси, а тільки ті, які формуються в найдинамічніші моменти зміни вихідної функції розробленої структури (у нас в області правої межі діапазону зміни аргументу). Однак імітаційна модель такого підходу є складною і її розроблення та дослідження є предметом подальшої роботи в напрямку покращання точності конвеєрних логарифмічних ЧФП.

**Висновки.** Логарифмічні функціональні перетворювачі широко застосовують у вимірювальній та обчислювальній областях. Застосовуючи їх для оброблення величин, поданих у вигляді частоти імпульсної послідовності або число-імпульсного коду, доцільно застосовувати число-імпульсні логарифмічні функціональні перетворювачі, які уможливають функціональне перетворення під час формування паралельного коду аргументу перетворення. Разом з тим, у разі застосування ЧФП у складі інтелектуальних вимірювальних перетворювачів виникає конфлікт між намаганнями зменшити похибку квантування вимірювального перетворювача і похибку перетворення ЧФП. Причина конфлікту – пряма залежність похибки квантування вимірювального перетворювача і обернена залежність похибки перетворення ЧФП від його розрядності. Одним із способів подолання залежності похибки квантування від розрядності ЧФП є реалізація останнього на конвеєрних структурних елементах ЧФП. Однак конвеєрні ЧФП із зворотними зв'язками, до яких належить, зокрема, і логарифмічний ЧФП, характеризуються більшою, ніж класичні структури ЧФП, похибкою перетворення. Тому для таких структур актуальним є пошук способів зменшення похибки перетворення. Зокрема, для розробленої конвеєрної структури логарифмічного ЧФП ефективним способом зменшення похибки перетворення є застосування таблично-алгоритмічної процедури функціональної обробки, тобто процедури періодичного або динамічно-залежного коригування результату перетворення.

1. Дудикевич В.Б. Число-імпульсні функціональні перетворювачі: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Львів, 1991. 2. Горпенюк А.Я. Принципи побудови конвеєрних

базових вузлів число-імпульсних вимірювальних перетворювачів: "Контроль і управління в технічних системах" (КУТС-97). Книга за матеріалами конференції: Том 2.-: "Універсум-Вінниця", 1997. – с.137–140. 3. Дудикевич В.Б., Максимович В.М. Оцінка сумісності число-імпульсних функціональних перетворювачів з пристроєм для квантування // Вісник ДУ "Львівська політехніка" – "Автома-

тика, вимірювання та керування", N283, 1994. – С. 30–34. 4. Горпенюк А.Я., Дудикевич В.Б., Лужецька Н.М. Імітаційне моделювання конвеєрних число-імпульсних функціональних перетворювачів // Вісний НУ "Львівська політехніка". – 2005. – №530. – С. 66–75. 5. Каляев А.В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой. – М., 1984.

## DYNAMIC PROPERTIES OF TRANSDUCERS TESTING USING WHITE NOISE EXCITATION. PART 1: TIME DOMAIN

© Hanus Robert, 2006

Rzeszów University of Technology,  
Department of Metrology and Measurement Systems  
2B, W. Pola Street, 35-959 Rzeszów,  
Poland; e-mail: rohan@prz.rzeszow.pl

*This article deals with experimental non-parametric methods of parameters qualifying dynamic properties of transducers of voltage/voltage type using external stochastic input function (white noise) and cross-correlation function.*

**Introduction.** Experimental non-parametric methods of testing dynamic properties of transducers using external input function taking into consideration the type of applied testing signals can be divided into:

- a) deterministic - in which the input function are determined testing signals;
- b) probabilistic – in which stationary random signals are the input function (usually white noise).

In each of previously mentioned methods of testing one can operate, reckoning and analysing transducer's response in the time or frequency domain. Applying this criterium a more detailed classification of methods can be produced, in which the basis of reckoning the parameters determining dynamic properties of transducers is constituted by [1-6, 8-13]:

- a1) the response to step function (the most common), impulse function or velocity rush;
- a2) frequency characteristics;
- b1) *cross-correlation function of input and output signals;*
- b2) power spectral density function of output signal or cross-spectral density function of input and output signals.

In this work it is assumed that the input signal is white noise type  $N(0, \sigma_x)$ , its autospectrum is uniform and wide enough in comparison to examined frequency band system and the system itself is stationary and linear. To compute the cross-correlation function Brüel & Kjaer 3550 [9] digital signal analyser has been applied. In figure 1 there is a block diagram of a measurement system.

**Determination of transducers dynamics parameters on the basis of the course of cross-correlation function.** Cross-correlation function  $R_{xy}(\tau)$  is connected with the impulse response of system  $k(t)$  by dependence [1–4]:

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} k(t) R_x(t - \tau) dt, \quad (1)$$

where:  $R_x(\tau)$  - autocorrelation function of input signal. For the white noise characterised by constant power spectral density function  $G_x(\omega) = a = \text{const}$ ,  $R_x(\tau) = a\delta(\tau)$  and the dependence (1) can be written:

$$R_{xy}(\tau) = ak(\tau). \quad (2)$$

When occur internal noise of examined object (noncorrelated with input signal), can be shown that equation (2) takes the form [4]:

$$R_{xy}(\tau) = ak(\tau) + c, \quad (3)$$

where  $c$  – constant.

Constant  $c$  can be easily separate from course  $R_{xy}(\tau)$ .

### 2.1. Inertial transducer of the 1<sup>st</sup> order

Impulse response of inertial transducer of the 1<sup>st</sup> order for  $x(t) = A\delta(t)$  is given by:

$$k(t) = \frac{kA}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (4)$$

where:  $A = \text{const}$  – input impulse surface,  $T$  – time-constant of transducer.