

Н.М. Лужецька, В.Б. Дудикевич, А.Я. Горпенюк
Національний університет “Львівська політехніка”
кафедри “Захист інформації”, “Безпека інформаційних технологій”
79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

СТЕПЕНЕВИЙ КОНВЕЄРНИЙ ЧИСЛО-ІМПУЛЬСНИЙ ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

© Наталія Лужецька, Валерій Дудикевич, Андрій Горпенюк, 2011

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

The results of conveyor structure of power 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 power structure of exponential transformer exactness improvement.

Постановка проблеми. Степеневі число-імпульсні функціональні перетворювачі (ЧІФП) поряд з іншими ЧІФП широко використовуються у вимірювальній та обчислювальній техніці там, де має місце розгортання аргументу функції у послідовність приростів, повне або часткове табулювання функції у заданому діапазоні. Класичні ЧІФП як правило реалізують на нагромаджуючих суматорах, які застосовують як цифрові інтегратори і будують на комбінаційних суматорах з послідовним, паралельним або комбінованим переносом. Такі ЧІФП характеризуються високою точністю перетворення – абсолютна похибка перетворення як правило складає одиниці молодшого розряду результату перетворення. Разом з тим максимальна частота роботи класичних ЧІФП обмежується затримкою спрацювання суматорів, включених послідовно в структурі ЧІФП. Низька частота роботи обмежує можливості збільшення частоти квантування аргументу відтворюваної функції і таким чином впливає не тільки на швидкодію перетворювача, але-й на його точність. Таким чином сьогодні актуальною залишається задача підвищення максимальної частоти роботи ЧІФП. Вирішення цієї задачі дозволяє застосовувати вищу частоту квантування і збільшувати таким чином точність вимірювання. Підвищення максимальної частоти роботи класичних ЧІФП можливе за рахунок зменшення їх розрядності, що збільшує похибку перетворення ЧІФП. Це протиріччя обмежує можливості подальшого підвищення точності вимірювальних перетворювачів, побудованих із застосуванням класичних структур ЧІФП [1,4]. Для вирішення проблеми залежності максимальної частоти роботи ЧІФП та його розрядності було розроблено конвеєрні структурні елементи ЧІФП [2]. Їх максимальна частота роботи не залежить від розрядності і

є значно вищою за максимальну частоту роботи класичних структурних елементів. Однак у випадку, якщо конвеєрний ЧФП має замкнуту структуру, тобто має зворотні зв'язки, його похибка перетворення зростає через затримку сигналу зворотного зв'язку [2]. В таких випадках виникає необхідність дослідження точності конвеєрних ЧФП, зокрема степеневого конвеєрного ЧФП, і задача пошуку шляхів покращення його точності.

Вибір та дослідження класичної структури степеневого ЧФП. Розглянемо структурний синтез класичного степеневого ЧФП, вдосконалення якого шляхом конвеєризації структури дозволило досягти кращих показників швидкодії.

Для синтезу степеневого ЧФП застосуємо методику структурного синтезу ЧФП [1].

Необхідно відтворити функцію:

$$y = x^k \quad (1)$$

Відповідно до методики синтезу ЧФП [1], спочатку диференціюємо (1) з метою отримання породжуючого диференціального рівняння:

$$dy = kx^{k-1} dx \quad (2)$$

Враховуючи (1), (2) можна переписати у вигляді:

$$dy = k \frac{y}{x} dx \quad (3)$$

Далі розкладаємо (3) в систему рівнянь Шеннона [1]. Слід сказати, що такий розклад є неоднозначним. Подамо шість основних варіантів розкладу:

$$\begin{array}{ccc} \left\{ \begin{array}{l} d\alpha = \frac{2^n}{x} dx \\ d\beta = \frac{y}{2^n} d\alpha \\ dy = \frac{k}{2^n} d\beta \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} d\alpha = \frac{y}{2^n} dx \\ d\beta = \frac{2^n}{x} d\alpha \\ dy = \frac{k}{2^n} d\beta \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} d\alpha = \frac{k}{2^n} dx \\ d\beta = \frac{y}{2^n} d\alpha \\ dy = \frac{2^n}{x} d\beta \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} d\alpha = \frac{k}{2^n} dx \\ d\beta = \frac{2^n}{x} d\alpha \\ dy = \frac{y}{2^n} d\beta \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} d\alpha = \frac{2^n}{x} dx \\ d\beta = \frac{k}{2^n} d\alpha \\ dy = \frac{y}{2^n} d\beta \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} d\alpha = \frac{y}{2^n} dx \\ d\beta = \frac{k}{2^n} d\alpha \\ dy = \frac{2^n}{x} d\beta \end{array} \right. \end{array} \quad (4)$$

Для демонстрації особливостей число-імпульсного обчислювача степеневі функції оберемо один з варіантів систем (4). Подамо результати дослідження структури степеневого ЧФП, який побудовано за системою породжуючих диференціальних рівнянь Шеннона (5):

$$\left\{ \begin{array}{l} d\alpha = \frac{k}{2^n} dx \\ d\beta = \frac{y}{2^n} d\alpha \\ dy = \frac{2^n}{x} d\beta \end{array} \right. \quad (5)$$

Аналізуючи систему (5) робимо висновок, що для її реалізації необхідно два число-імпульсні помножувачі для моделювання двох перших рівнянь системи і один число-імпульсний дільник для моделювання третього рівняння системи. Далі за системою (5) будуємо число-імпульсну структуру для відтворення степеневі функції (1). При цьому застосовуємо число-імпульсний дільник з від'ємним зворотним зв'язком [1]. Число-імпульсну структуру степеневого ЧІФП подано на Рис.1.

Степеневий ЧІФП містить два число-імпульсні помножувачі та один число-імпульсний дільник. Перший помножувач (суматор СМ1 та регістр РГ1), відтворює перше рівняння системи (5). Другий помножувач (лічильник ЛЧ2, СМ2, РГ2), відтворює друге рівняння системи (5). Число-імпульсний дільник, побудований на лічильнику ЛЧ3, суматорі СМ3, регістрі РГ3 та схемі віднімання СВ, відтворює третє рівняння (5).

Визначимо функцію, яку відтворює схема на Рис.1. З врахуванням принципів роботи число-імпульсних помножувачів та дільника [1], робота структури описується системою (6):

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \frac{k}{2^n} \Delta x \\ \Delta\beta = \frac{y}{2^n} \Delta\alpha \\ \Delta y = \frac{2^n}{x} \Delta\beta \end{cases} \quad (6)$$

Підставляючи в третє рівняння системи (6) перші два рівняння, отримаємо:

$$\Delta y = \frac{2^n}{x} \Delta\beta = \frac{2^n}{x} \cdot \frac{y}{2^n} \cdot \Delta\alpha = \frac{2^n}{x} \cdot \frac{y}{2^n} \cdot \frac{k}{2^n} \cdot \Delta x = \frac{k \cdot y}{2^n \cdot x} \Delta x \quad (7)$$

Рівняння (7), яке описує роботу структури, можна наблизити таким диференціальним рівнянням:

$$dy = \frac{k \cdot y}{2^n \cdot x} dx \quad (8)$$

Розв'язавши рівняння (8), отримаємо:

$$y = \frac{y_0}{x_0^{k/2^n}} \cdot x^{k/2^n} \quad (9)$$

Враховуючи принцип роботи число-імпульсного дільника з від'ємним зворотним зв'язком [1], маємо:

$$x_0 = 2^n \quad (10)$$

Якщо забезпечити:

$$y_0 = (2^n)^{k/2^n}, \quad (11)$$

отримаємо:

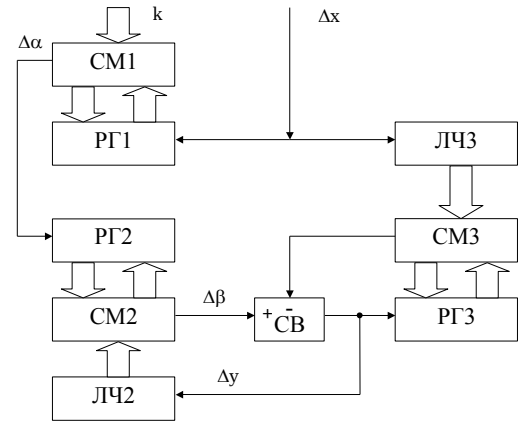


Рис.1. ЧІФП степеневі функції

$$y = x^{k/2^n} \quad (12)$$

Аналізуючи (12) приходимо до висновку, що такий степеневий ЧІФП можна вибрати як базову структуру обчислювача степеневі функції для подальшого вирішення задачі підвищення швидкодії степеневих обчислювачів.

З метою дослідження базової структури число-імпульсного обчислювача степеневі функції було розроблено імітаційну модель такої структури. При розробці імітаційної моделі застосовувалися алгоритми, запропоновані в роботі [5].

Проаналізуємо діапазон перетворення базової структури (Рис.1). Оскільки структура на Рис.1 містить лічильник для підрахунку одиничних приростів аргументу Δx і не містить відомих засобів для розширення діапазону перетворення [1], права межа діапазону перетворення структури визначається максимальною місткістю цього лічильника. Ліва межа діапазону зміни аргументу, що впливає з принципу роботи число-імпульсного дільника з від'ємним зворотним зв'язком, обмежена числом 2^n (що відповідає одному переповненню лічильника ЛЧЗ). Звідси робимо висновок, що права межа діапазону перетворення $2^{(n+1)}$ (що відповідає другому переповненню ЛЧЗ). Отже:

$$2^n < X < 2^{(n+1)} \quad (13)$$

Перейдемо тепер до аналізу швидкодії базової структури. Причому будемо аналізувати максимальну частоту її роботи. Другий критерій швидкодії – час перетворення – аналізувати не будемо, оскільки число-імпульсні структури [1] працюють в реальному масштабі часу і тому їх час перетворення визначає тільки фіксовану затримку формування результату перетворення для кожного з аргументів заданої функції (в нашому випадку степеневі). Щодо максимальної частоти роботи, то цей показник далеко 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 кантується вимірювана величина. Тому підвищуючи частоту надходження цих приростів ми тим самим покращуємо точність перетворювача, оскільки зменшуємо похибку квантування.

Відомо [1], що максимальна частота спрацювання класичної число-імпульсної структури (побудованої на не конвеєрних структурних елементах) обернено пропорційна до часу послідовного спрацювання всіх n – розрядних нагромаджуючих суматорів структури, включених послідовно. В базовій число-імпульсній структурі обчислювача степеневі функції таких послідовно включених нагромаджуючих суматорів три (Рис.1). Тому максимальна частота роботи такої структури обернено пропорційна часу спрацювання трьох n – розрядних нагромаджуючих суматорів:

$$f_m = \frac{1}{3t_{sm(n)}} \quad (14)$$

де $t_{sm(n)}$ – час спрацювання n - розрядного суматора.

Перейдемо тепер до оцінки точності базової структури число-імпульсного обчислювача степеневі функції.

Як відомо [1,5], для оцінки точності таких структур застосовують імітаційне моделювання. Саме тому для дослідження точності роботи базової структури число-імпульсного обчислювача степеневі функції було розроблено її імітаційну модель.

Похибка перетворення базової структури визначалася за допомогою імітаційного моделювання. Принципи і алгоритми моделювання детально розглянуто в роботі [5].

На Рисунку 2 подано графік залежності абсолютної похибки перетворення базової структури, вираженої в одиницях молодшого розряду, від величини аргументу X . Цей графік відповідає результатам дослідження 12-розрядного варіанту класичної структури перетворювача (Рис.1). З графіка похибки (Рис.2) видно, що абсолютна похибка перетворення базової структури число-імпульсного обчислювача степеневі функції не перевищує одиниці молодшого розряду, тобто точність такої структури є достатньо високою і відповідає критерію метрологічної доцільності число-імпульсних структур.

Таким чином, результати дослідження структури ЧІФП степеневі функції (Рис.1) доводять, що така структура дійсно може бути обрана як базова для подальшого покращення швидкодії.

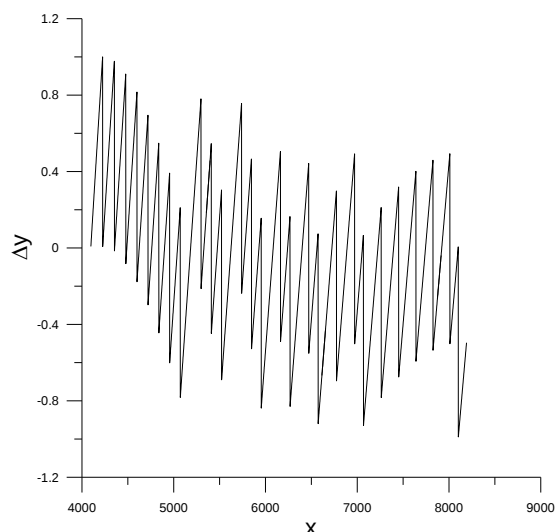


Рис.2. Результати імітаційного моделювання базової структури ЧІП степеневої функції

Розроблення та дослідження конвеєрної структури степеневого ЧФП.

З метою покращення швидкодії базову число-імпульсну структуру обчислювача степеневої функції (Рис.1) було побудовано на конвеєрних структурних елементах [2].

Розроблена структурна
схема подана на Рис.3.

В розробленій структурі п – розрядний конвеєрний лічильник ЗКЛЧ інтегрує прирости ΔX аргументу степеневі функції, а регістр зсуву ЗРГЗ, група ключів ЗГК, конвеєрний нагромаджуючий суматор ЗКНС і схема віднімання СВ складають конвеєрний число-імпульсний дільник, який формує послідовність одиничних приростів результату

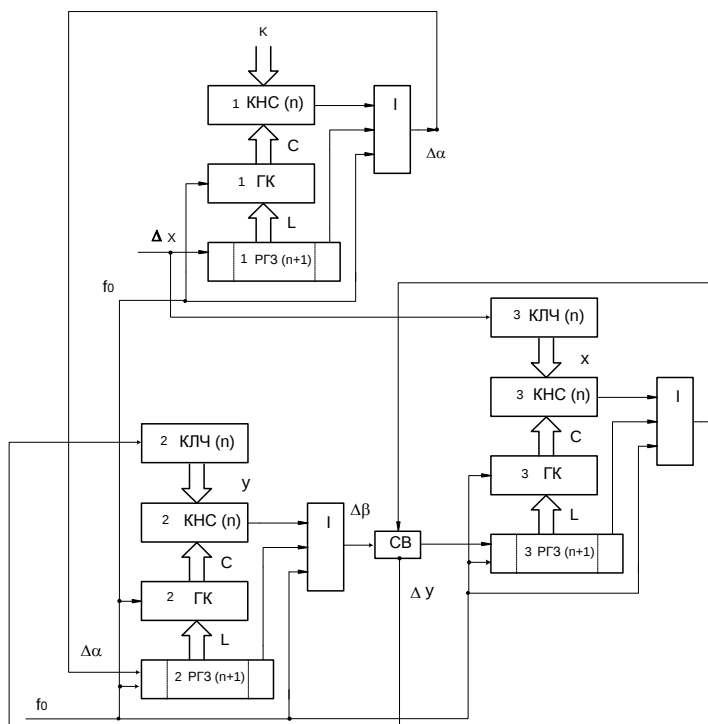


Рис.3. Структурна схема конвеєрного обчислювача степеневої функції

обчислення степеневі функції у. Конвеєрний лічильник результату 2КЛЧ інтегрує прирости результату обчислення степеневі функції, а регістр зсуву 2РГЗ, група ключів 2ГК і конвеєрний нагромаджуючий суматор 2КНС складають конвеєрний число-імпульсний помножувач, який формує імпульсну послідовність зворотного зв'язку $\Delta\beta$ відповідно до (6). Регістр зсуву 1РГЗ, група ключів 1ГК і конвеєрний нагромаджуючий суматор 1КНС складають конвеєрний число-імпульсний помножувач, який формує імпульсну послідовність зворотного зв'язку $\Delta\alpha$ відповідно до (6).

Проаналізуємо діапазон перетворення розробленої конвеєрної структури (Рис.3). Оскільки структура на Рис.3 містить лічильник для підрахунку одиничних приростів аргументу Δx і 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, що впливає з принципу роботи число-імпульсного дільника з від'ємним зворотним зв'язком обмежена числом 2^n (що відповідає одному переповненню лічильника 3КЛЧ (Рис.3)). Звідси робимо висновок, що права межа діапазону перетворення $2^{(n+1)}$ (що відповідає другому переповненню 3КЛЧ). Отже:

$$2^n < X < 2^{(n+1)} \quad (15)$$

Перейдемо тепер до аналізу швидкодії розробленої структури. Причому як і при дослідженні класичної структури будемо аналізувати максимальну частоту її роботи. Ми в розробленій структурі застосували конвеєрні структурні елементи. Як відомо [2] їх максимальна частота роботи не залежить від розрядності і дорівнює:

$$f_m = f_{0\max} = \frac{1}{t_T + t_{1CM}} \quad (16)$$

де t_T – час спрацювання тригера регістра, t_{1CM} – час спрацювання одно розрядного суматора. Очевидно, що:

$$t_T > t_{1CM} \quad (17)$$

Тому:

$$f_m > \frac{1}{2t_T} \quad (18)$$

Прийmemo:

$$f_0 > \frac{1}{t_T} \quad (19)$$

максимальна частота роботи вибраної елементної бази. Тоді максимальна частота роботи конвеєрного число-імпульсного обчислювача степеневі функції відповідно до (18) і враховуючи (19) не залежить від розрядності і дорівнює:

$$f_m \approx \frac{f_0}{2} \quad (20)$$

Очевидно, що максимальна частота роботи розробленої конвеєрної структури, яка визначається виразом (20) є значно вищою за максимальну частоту роботи класичних не конвеєрних структур аналогічного призначення. Із співвідношень (14), (20) випливає, що максимальна частота роботи розробленої конвеєрної структури приблизно у 18 разів більша за максимальну частоту роботи класичної структури степеневого ЧІФП (якщо вважати час спрацювання одно розрядної секції суматора приблизно рівною часу спрацювання тригера).

Перейдемо тепер до оцінки точності розробленої конвеєрної структури обчислювача степеневій функції. Точність конвеєрної структури, як і класичної, досліджувалася шляхом її імітаційного моделювання. Було розроблено імітаційну модель конвеєрного степеневого ЧФП відповідно до принципів, викладених в [5].

Результати моделювання розробленої конвеєрної структури обчислювача степеневій функції, які отримані за допомогою програми імітаційного моделювання подано на Рис.4 у вигляді графіку залежності похибки перетворення 12-розрядного варіанту конвеєрної структури обчислювача степеневій функції від значення аргументу функції. Ці результати показують, що розроблена структура характеризується більшою абсолютною похибкою перетворення (в результатах похибка перетворення дана в одиницях молодшого цілого розряду результату перетворення) ніж базова класична структура (результати моделювання класичної структури – на Рис.2). Це пояснюється тим, що імпульси зворотного зв'язку затримуються розробленою конвеєрною структурою на час, значно більший (в n раз, де n – розрядність структури) за період вхідної імпульсної послідовності. Разом з тим відносна похибка конвеєрної структури залишається незначною. Крім того, і абсолютна похибка перетворення конвеєрної структури степеневого ЧФП, на відміну від відомої конвеєрної структури показникового ЧФП [6], збільшилась дуже незначно – вона не виходить за межі 2 одиниць молодшого розряду перетворення, хоча затримка сигналу зворотного зв'язку складає 12 тактів. Це пояснюється глибоким від'ємним зворотним зв'язком, яким охоплено структуру на Рис.3.

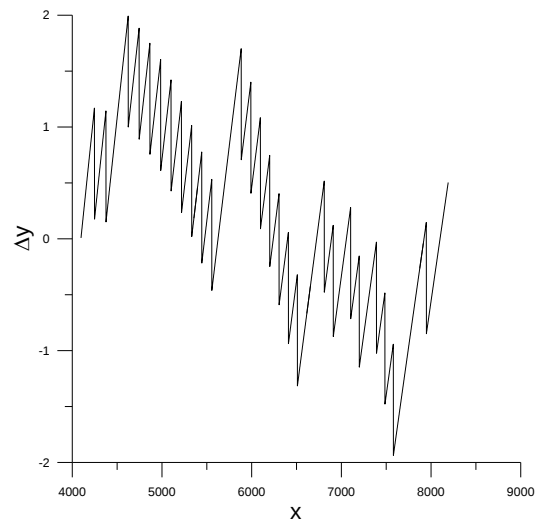


Рис.4. Результати імітаційного моделювання конвеєрної структури обчислювача степеневій функції

Таким чином, якщо не враховувати співвідношення частот роботи класичного та конвеєрного число-імпульсного обчислювачів степеневій функції, або що те саме – співвідношення ваг одиниці число-імпульсного коду, яким подається аргумент обох структур, доводиться визнати, що точність конвеєрної структури число-імпульсного обчислювача степеневій функції є гіршою за точність класичної структури.

Разом з тим з точки зору практичного застосування необхідним є аналіз і порівняння класичної та розробленої конвеєрної структур з врахуванням максимальної частоти їх роботи. Адже вища частота роботи конвеєрної структури дозволяє ділити аргумент на менші прирости, що в свою чергу визначає меншу вагу одиниці молодшого розряду конвеєрної структури. Таким чином отриману значну перевагу у швидкодії можна з надлишком розмінати на точність перетворювача.

Висновки. Дослідження класичної структури степеневого ЧФП за допомогою розробленої імітаційної моделі підтвердило високу точність такого ЧФП, а також відносно невелику частоту його роботи за рахунок наявності в структурі трьох послідовно включених нагромаджуючих суматорів. Для підвищення максимальної частоти роботи степеневого ЧФП запропоновано застосувати в його структурі конвеєрні структурні

елементи. Дослідження розробленої конвеєрної структури степеневого ЧІФП за допомогою його імітаційної моделі показало незначне погіршення точності за абсолютними показниками. Разом з тим максимальна частота роботи розробленої конвеєрної структури є значно вищою за частоту роботи класичної структури – приблизно в 18 раз для 12-розрядного варіанту досліджених структур. Це дозволяє прогнозувати як вищу швидкодію конвеєрного степеневого ЧІФП, так і кращу точність за рахунок можливості застосування вищої частоти квантування аргумента степеневі функції.

1. Дудикевич, В. Б. Число-імпульсні функціональні перетворювачі [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук./ Дудикевич Валерій Богданович. - Львів, 1991. 2. Горпенюк, А. Я. Принципи побудови конвеєрних базових вузлів число-імпульсних вимірювальних перетворювачів [Текст, рисунки] / Горпенюк А.Я. // : "Контроль і управління в технічних системах" (КУТС-97). Книга за матеріалами конференції: Том2.-: "Універсум-Вінниця". - 1997. - С. 137-140. 3. Горпенюк, А. Я. Конвеєрний синусно-косинусний число-імпульсний функціональний перетворювач [Текст, рисунки] / Горпенюк А.Я., Дудикевич В.Б., Лужецька Н.М. // Вісник НУ "Львівська політехніка" – "Автоматика, вимірювання та керування". - 2009. - №639. - С. 94-101. 4. Дудикевич, В. Б. Оцінка сумісності число-імпульсних функціональних перетворювачів з пристроєм для квантування [Текст] / Дудикевич В.Б., Максимович В.М. // Вісник ДУ "Львівська політехніка" - "Автоматика, вимірювання та керування". – 1994. - N283. - С. 30-34. 5. Горпенюк, А. Я. Імітаційне моделювання конвеєрних число-імпульсних функціональних перетворювачів [Текст] / Горпенюк А.Я., Дудикевич В.Б., Лужецька Н.М. // Вісник НУ "Львівська політехніка" – "Автоматика, вимірювання та керування". - 2005. - №530. - С. 66-75. 6. Горпенюк, А. Я. Дослідження показникового конвеєрного число-імпульсного функціонального перетворювача [Текст, рисунки] / Горпенюк А.Я., Дудикевич В.Б., Лужецька Н.М. // Вісник НУ "Львівська політехніка" – "Автоматика, вимірювання та керування". - 2010. - №665. - С. 45-52.