

Часова динамічна відносна похибка імітації опору описується виразом:

$$\delta Z(t) = \frac{U(t)/I_{\text{вх}} - U_{\text{н}}(t)/I_{\text{вх}}}{U_{\text{н}}(t)/I_{\text{вх}}} = \frac{U(t) - U_{\text{н}}(t)}{U_{\text{н}}(t)}, \quad (11)$$

де  $U_{\text{н}}(t)$  – номінальне значення вихідної напруги в точках імітації опору.

За допомогою програмного пакета MathCAD 2000 отримано графічні залежності часової динамічної похибки імітації опору (рис.4), а також залежності часу встановлення вихідного сигналу від значень  $R$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  з точністю до 0.01% (рис. 5).

З аналізу графічних залежностей видно, що час встановлення залежить від значень  $R$ ,  $C_2$  і практично не залежить від  $C_1$ . Час встановлення не перевищує 1с, якщо значення  $R$  і  $C_2$  не перевищують 10 кОм і 10 мФ, відповідно. При збільшенні  $R$  або  $C_2$  на порядок час встановлення буде більшим від 4 с.

### Висновки

Застосування компенсаційної схеми за струмом і додаткових ємнісних зв'язків дає змогу підвищити завадостійкість активних імітаторів опору. Вибором значень ємностей конденсаторів  $C_1$ ,  $C_2$  і додаткового резистора  $R$  можна досягти компромісу між послабленням завад і динамічними характеристиками активного імітатора опору в конкретних промислових умовах.

Використання запропонованого АІО в промислових умовах забезпечить необхідну точність перевірки перетворювачів, вхідним сигналом яких є опір.

1. *Электрические измерения электрических и неэлектрических величин / Под ред. Е.С. Полищука. – К., 1984.* 2. *Михайлов Е.В. Помехозащищенность информационно – измерительных систем. – М., 1975.* 3. *Бойко О. Влияние завад у чотирипровідних активних імітаторах опору // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2003. – №62. – С. 28–31.* 4. *Серьезнов А.Н., Цапенко М.П. Методы уменьшения влияния помех в термометрических цепях. – М., 1968.* 5. *Швецкий Б.И. Электронные цифровые приборы. – К., 1981.* 6. *Малиновский В.И. Цифровые вольтметры интегрирующего типа (Обзор) // Приборы и системы управления, 1973. – №2. – С.10–13.*

УДК 621.374

А.Я. Горпенюк, В.Б. Дудикевич, Н.М. Лужецька  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматики і телемеханіки

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНВЕЄРНИХ ЧИСЛО-ІМПУЛЬСНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Горпенюк А.Я., Дудикевич В.Б., Лужецька Н.М., 2005

Розглянуто способи імітаційного моделювання конвеєрних число-імпульсних функціональних перетворювачів. Запропоновано моделі базових конвеєрних число-імпульсних вузлів і алгоритми моделювання конвеєрних число-імпульсних структур загалом.

The methods of imitation design of conveyor pulse-number functional converters are considered in the article. The models of base conveyor pulse-number nodes and algorithms of conveyor pulse-number structures design are offered .

### Постановка проблеми

Нехай перед нами стоїть задача функціонального перетворення деякої змінної фізичної величини. Будь-яка фізична величина може бути перетворена в імпульсну послідовність (порівнянням із зразковою мірою). Інформативними параметрами імпульсної послідовності, зокре-

ма, можуть бути частота і кількість імпульсів. Такі види подання інформації, як частота і число-імпульсний код, дають змогу здійснити розгортаюче функціональне перетворення, в основі якого лежить процес цифрової функціональної розгортки, тобто послідовність обчислень значень функції для сусідніх значень аргументів. Кожне наступне значення функції обчислюється з урахуванням попереднього результату. Основною перевагою таких обчислень є здатність здійснювати функціональне перетворення в реальному масштабі часу. Такого типу обчислення вигідно реалізувати при табулюванні функцій, при обчисленнях однієї і тієї самої функції для різних значень аргументу, при вимірюваннях різних фізичних величин, у ході яких вимірювана величина квантується зразковою.

Зручним засобом функціонального оброблення число-імпульсних кодів є число-імпульсні функціональні перетворювачі – ЧФП [1]. Таким перетворювачам властивий неалгоритмічний (аналітичний) принцип оброблення інформації. Тобто ЧФП – це модель ідеального функціонального перетворювача, в якій аналітична залежність між вихідними і вхідними величинами подібна до аналітичної залежності між відповідними величинами ідеального перетворювача. Отже, принцип роботи ЧФП нагадує принцип роботи аналогових обчислювальних машин. Разом з тим ЧФП, які ще називають цифровими інтеграторами, реалізуючи наближені числові методи обчислення означеного інтеграла, є цифровими пристроями і характеризуються вищою точністю порівняно з аналоговими обчислювачами. Однак ЧФП поступаються аналоговим обчислювачам за швидкодією.

Проблема підвищення швидкодії, зокрема максимальної частоти роботи ЧФП, завжди була і є актуальною. Підвищення частоти роботи ЧФП дає змогу підвищити швидкодію обчислювача, а у разі застосування ЧФП при вимірюваннях дає змогу застосувати вищу частоту квантування і підвищити ще й точність вимірювання.

Отже, актуальними сьогодні є розроблення і дослідження методів та засобів підвищення максимальної частоти роботи ЧФП. Зважаючи на те, що нині не існує аналітичних методів оцінки точності ЧФП [1,2], а для конвеєрних ЧФП [2] з високою частотою роботи не розроблено також їх імітаційно-математичних моделей, які застосовують для дослідження ЧФП, особливо актуальною є проблема розроблення методів та засобів дослідження конвеєрних ЧФП.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

У [2] для підвищення швидкодії, а саме частоти спрацювання ЧФП, запропоновано застосовувати конвеєрні методи обробки інформації. Зокрема запропоновано принципи побудови конвеєрних структурних елементів ЧФП. Розглянемо особливості побудови таких структурних елементів, їх переваги та недоліки, можливі напрямки вдосконалення.

На відміну від традиційних методів, в яких обчислення кожного наступного значення функції можливе тільки після повнорозрядної обробки попереднього значення аргументу, конвеєрні методи [2] дають змогу обробляти кожне нове значення аргументу під час того, як обробка попереднього значення ще не закінчилась.

Розглянемо відому схему одного з найпоширеніших структурних елементів конвеєрних ЧФП – конвеєрного число-імпульсного помножувача (ЧП), що працює у стаціонарному режимі [2]. Структурну схему пристрою подано на рис.1.

Схема складається з  $n$ -розрядного конвеєрного нагромаджувального суматора  $KHC$ ,  $(n+1)$ -розрядного регістра зсуву  $РГЗ$ , схеми збігу  $I$  та групи ключів  $ГК$ . На  $KHC$  подається  $n$ -розрядний двійковий код коефіцієнта множення  $A$ . Робота  $KHC$  синхронізується  $n$ -розрядним кодом  $C$ , який виробляється регістром зсуву  $РГЗ$  та групою ключів  $ГК$ . Молодший розряд  $РГЗ$  служить для асинхронного запам'ятовування вхідного одиничного приросту  $\Delta x$ , старший – синхронізує формування вихідного приросту  $\Delta z$ . Робота  $РГЗ$  синхронізується імпульсною послідовністю  $f_0$ . Ключ  $I$  формує вихідний приріст структури в момент, коли високий рівень сигналу одночасно зафіксовано на вході  $f_0$ , на виході перенесення  $P$   $KHC$  і на виході старшого розряду  $РГЗ$ . Роботу структури докладніше розглянемо на прикладі функціональної схеми чотирирозрядного конвеєрного ЧФП (рис. 2).

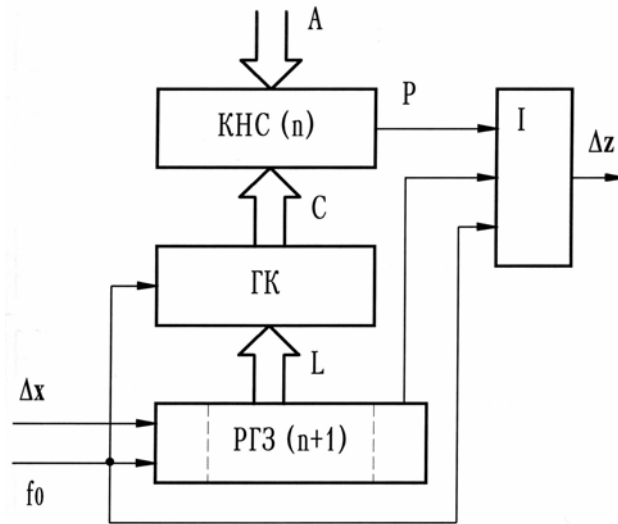


Рис. 1. Структурна схема конвеєрного число-імпульсного помножувача

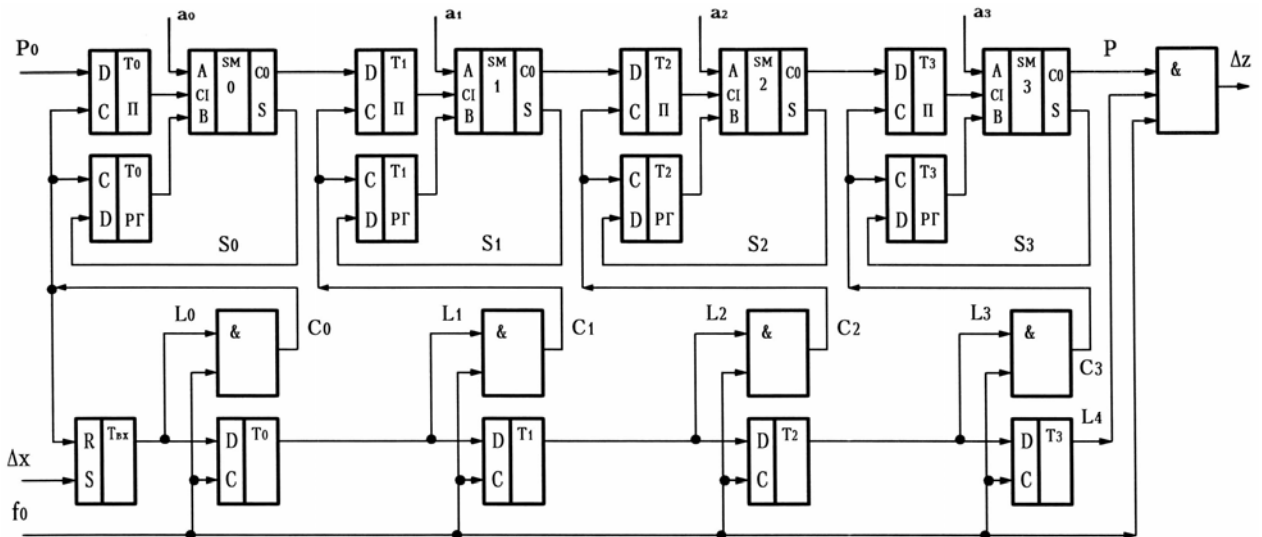


Рис. 2. Функціональна схема чотирирозрядного стаціонарного конвеєрного ЧІП

На схемі тригери  $ТОП$  –  $ТЗП$ ,  $ТОРГ$  –  $ТЗРГ$  і повні суматори  $SM0$  –  $SM3$  складають чотирирозрядний конвеєрний нагромаджувальний суматор. На тригерах  $Tvx$ ,  $T0$  –  $T4$  побудовано регістр зсуву. Проаналізуємо роботу схеми. Нехай перед початком роботи всі тригери схеми обнулені. Перший одиничний приріст  $\Delta x_1$ , який надходить на вхід схеми, асинхронно записується в тригер  $Tvx$ . З надходженням тактового імпульсу послідовності  $f_0$  приріст  $\Delta x_1$  синхронно переписується в тригер  $T0$ , після чого (відповідна схема збігу відкрита, а тому  $C0=1$ ) тригер  $Tvx$  обнулюється. Одночасно ( $C0=1$ ) в тригери  $ТОП$  і  $ТОРГ$  записуються, відповідно, значення вхідного перенесення суматора  $P0$  і значення  $S0$  результату підсумовування молодшого розряду коефіцієнта  $A$  ( $a_0$ ) та попереднього вмісту тригера  $ТОРГ$ . Тобто спрацьовує молодший розряд число-імпульсного помножувача. Після цього в тригер  $Tvx$  може бути записаний наступний вхідний приріст  $\Delta x_2$ , який з надходженням наступного тактового імпульсу буде переписано в тригер  $T0$ . В тригер  $T1$  – буде переписано  $\Delta x_1$  з тригера  $T0$ . Отже, на цьому другому такті роботи схеми вхідний приріст  $\Delta x_2$  обробляється молодшим розрядом схеми, а приріст  $\Delta x_1$  – вже другим розрядом ЧІП. З надходженням третього тактового імпульсу конвеєрним ЧІП можуть одночасно оброблятися вже три вхідні прирости:  $\Delta x_3$  – молодшим розрядом суматора,  $\Delta x_2$  – розрядом суматора з вагою 2,  $\Delta x_1$  – розрядом суматора з вагою 4. На четвертому такті роботи буде відпрацьовано підсумовування

розрядів з вагою 8 для  $\Delta x_1=1$ , розрядів з вагою 4 для  $\Delta x_2=1$ , розрядів з вагою 2 для  $\Delta x_3=1$  і розрядів з вагою 1 для  $\Delta x_4=1$ . На п'ятому такті схема може одночасно формувати вихідний приріст  $\Delta z_1$ , який відповідає вхідному приросту  $\Delta x_1=1$ , підсумовувати розряди з вагою 8 для  $\Delta x_2=1$ , розряди з вагою 4 для  $\Delta x_3=1$ , розряди з вагою 2 для  $\Delta x_4=1$  і розряди з вагою 1 для  $\Delta x_5=1$ . Отже, в схемі на рис. 2 реалізується порозрядна конвеєрна процедура обробки приростів  $\Delta x$ . Тобто в конвеєрному число-імпульсному помножувачі може одночасно оброблятися кілька приростів  $\Delta x$ , а саме стільки, скільки в ньому є розрядів. Загалом схема  $n$ -розрядного стаціонарного конвеєрного ЧПП складається з  $n$  однорозрядних секцій конвеєрного нагромаджувального суматора, робота кожного  $i$ -го з яких тактується послідовністю  $C_i$ , яка виробляється  $(n+1)$ -розрядним регістром зсуву. Час перетворення такої схеми дорівнює тривалості  $n$  тактів:

$$t_n = \frac{n}{f_{0\max}} = n \cdot (t_T + t_{1CM}) \quad (1)$$

Максимальна частота роботи схеми залежить від часу спрацювання однорозрядного суматора і дорівнює:

$$f_m = f_{0\max} = \frac{1}{t_T + t_{1CM}} \quad (2)$$

де  $t_T$ ,  $t_{1CM}$  – час спрацювання, відповідно, тригера і однорозрядного суматора.

Ми розглянули структуру конвеєрного ЧПП, що працює в стаціонарному режимі. Однак практично всі відомі ЧФП будуються на число-імпульсних помножувачах, які працюють в динамічному режимі. Такі помножувачі мають лічильник приростів підінтегральної функції. Для конвеєрного помножувача необхідно передбачити конвеєрний лічильник приростів. Функціональну схему такого лічильника [2] подано на рис.3.

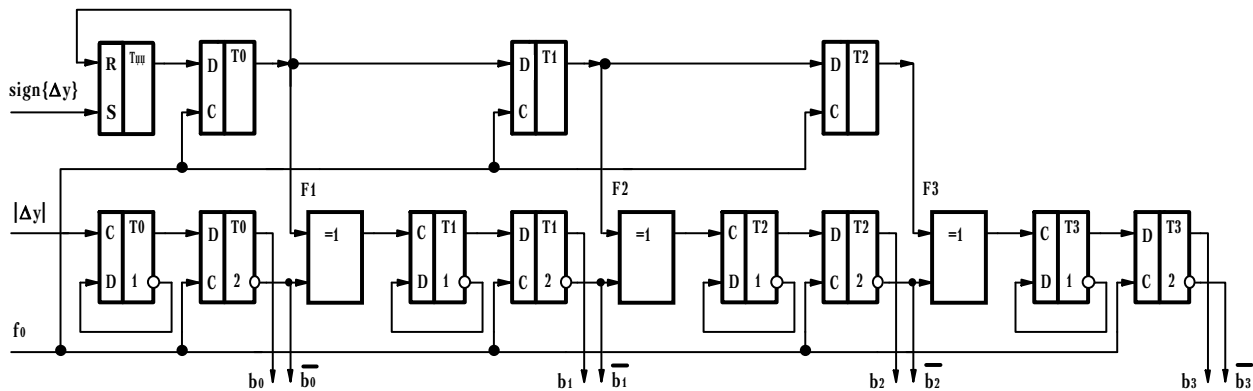


Рис. 3. Функціональна схема чотирирозрядного конвеєрного лічильника

Код  $B$ , який формується в конвеєрному реверсивному лічильнику КРЛЧ, зв'язаний із значеннями підінтегральної функції  $y_i$  таким співвідношенням:

$$y_i = b_{0(j+1)} \cdot 2^0 + b_{1(j+2)} \cdot 2^1 + \dots + b_{ks} \cdot 2^k + \dots + b_{(n-1)(j+n)} \cdot 2^{(n-1)}, \quad (3)$$

де  $y_i$  – двійковий код значення підінтегральної функції на  $i$ -му кроці інтегрування,  $j$  – номер такту, на якому на вхід структури надійшов приріст змінної інтегрування  $|\Delta x_i|=1$ ,  $b_{ks} \in \{0,1\}$  – біт розряду з вагою  $2^k$  коду  $B$  на  $s$ -му такті роботи схеми.

З іншого боку, якщо подати значення функції  $y_j$  на  $j$ -му такті роботи схеми у вигляді:

$$y_j = \alpha_{0j} \cdot 2^0 + \alpha_{1j} \cdot 2^1 + \dots + \alpha_{kj} \cdot 2^k + \dots + \alpha_{(n-1)j} \cdot 2^{(n-1)}, \quad (4)$$

де  $\alpha_{kj} \in \{0,1\}$  – значення розряду з вагою  $2^k$  коду  $y_j$  (підкреслимо, що індекс  $j$ , на відміну від індексу  $i$ , вказує на номер такту, а не на номер кроку інтегрування), то значення коду  $B_j$  на цьому самому такті:

$$B_j = \alpha_{0(j-1)} \cdot 2^0 + \alpha_{1(j-2)} \cdot 2^1 + \dots + \alpha_{k_s} \cdot 2^k + \dots + \alpha_{(n-1)(j-n)} \cdot 2^{(n-1)}, \quad (5)$$

де  $\alpha_{k_s} \in \{0,1\}$  – значення розряду з вагою  $2^k$  коду  $y_s$ . В граничному випадку (при максимальній частоті приростів змінної інтегрування) код  $B_j$  містить по одному розряду (різної ваги) з  $n$  значень підінтегральної функції на попередніх  $n$  кроках інтегрування:

$$B_j = B_i = \alpha_{0(i-1)} \cdot 2^0 + \alpha_{1(i-2)} \cdot 2^1 + \dots + \alpha_{k_m} \cdot 2^k + \dots + \alpha_{(n-1)(i-n)} \cdot 2^{(n-1)}, \quad (6)$$

де  $\alpha_{k_m} \in \{0,1\}$  – значення розряду з вагою  $2^k$  коду підінтегральної функції на  $m$ -му кроці інтегрування.

Отже, на схемі конвеєрного лічильника (рис. 3) тригери  $T_{\alpha x}$ ,  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  складають регістр зсуву, який набирає знаки приростів  $sign\{\Delta y\}$  і розподіляє їх в часі, формуючи керуючі сигнали реверсування однорозрядних секцій конвеєрного лічильника  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ . Однорозрядна секція лічильника складається із суматора за модулем 2 (в секції молодшого розряду лічильника цей елемент відсутній: – алгоритм роботи цієї секції не залежить від напряму підрахунку) та двох тригерів. Перший з цих тригерів (тригери  $T_{01} - T_{31}$  на рис. 3) виконує функцію, аналогічну до функції тригера асинхронного лічильника. Другий тригер ( $T_{02} - T_{32}$  на рис. 3) протягом кожного такту фіксує значення відповідного розряду конвеєрного лічильника. Паралельний двійковий код  $B$  ( $b_0 - b_3$ ) на виході схеми відповідає алгоритму роботи конвеєрного лічильника приростів підінтегральної функції. Якщо виходи  $b_0 - b_3$  схеми на рис. 3 з'єднати з входами  $a_0 - a_3$  схеми на рис. 2, отримаємо функціональну схему конвеєрного чотирирозрядного число-імпульсного помножувача.

### Мета роботи

Метою статті є розроблення засобів дослідження конвеєрних число-імпульсних функціональних перетворювачів зі зворотними зв'язками. Зокрема, подано результати розроблення та дослідження імітаційних моделей конвеєрних структурних елементів ЧФП. Застосування таких моделей при дослідженні конвеєрних ЧФП дає змогу прогнозувати характеристики таких перетворювачів, а також розробляти ефективні методи покращання їх точності.

### Проблема зворотних зв'язків у конвеєрних ЧФП

В [2] звернено увагу на проблему реалізації зворотних зв'язків у конвеєрних ЧФП. Суть проблеми в такому. З (1), (2) випливає, що час повнорозрядного оброблення конвеєрним ЧФП одного приросту змінної інтегрування (тобто одиниці вхідного число-імпульсного коду) 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 щодо 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], необхідно сказати, що подальші дослідження конвеєрних ЧФП зі зворотними зв'язками довели перспективність їх розроблення та дослідження. Зокрема, було показано, що в деяких випадках (для деяких функцій перетворення та розрядностей структурних елементів) конвеєрні ЧФП зі зворотними зв'язками повністю відповідають критерію метрологічної доцільності [3]. Тобто їх похибка перетворення співрозмірна з трансформованою похибкою квантування [3] – похибкою квантування, значення якої змінене функціональним перетворювачем відповідно до його функції перетворення. 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, які за відсутності аналітичних методів аналізу таких перетворювачів дали змогу моделювати конвеєрні ЧФП, достовірно прогнозувати їх метрологічні характеристики, досліджувати способи зменшення

похибки, зумовленої затримкою зворотних зв'язків. Саме імітаційні моделі конвеєрних структурних елементів ЧІФП і конвеєрних структур ЧІФП загалом і є предметом статті.

### Розроблення імітаційних моделей конвеєрних структурних елементів ЧІФП

При моделюванні класичних, неконвеєрних, структурних елементів ЧІФП вміст лічильників та регістрів нагромаджувальних суматорів моделювали цілим числом (беззнаковим). В конвеєрних структурних елементах різні біти кодів лічильників та регістрів формуються на різних тактах роботи структури. Тому вміст лічильників та регістрів зручніше моделювати вектором розміру  $n$  з цілими коефіцієнтами, де  $n$  – розрядність структурного елемента. За такого підходу до моделювання зручніше коригувати роботу конвеєрного структурного елемента на рівні окремих розрядів, що часто необхідно при розробленні та дослідженні різних способів покращання точності цього елемента. Регістр зсуву також моделюємо вектором. Наприклад при моделюванні структури на рис. 2 вектор регістру зсуву буде зберігати інформацію про наявність на останніх чотирьох тактах вхідних одиничних приростів  $\Delta x$ . За таких умов, а також враховуючи принцип роботи конвеєрного число-імпульсного помножувача, що працює в стаціонарному режимі (рис. 1, рис. 2), алгоритм його імітаційного моделювання можна подати такою структурою (рис. 4).

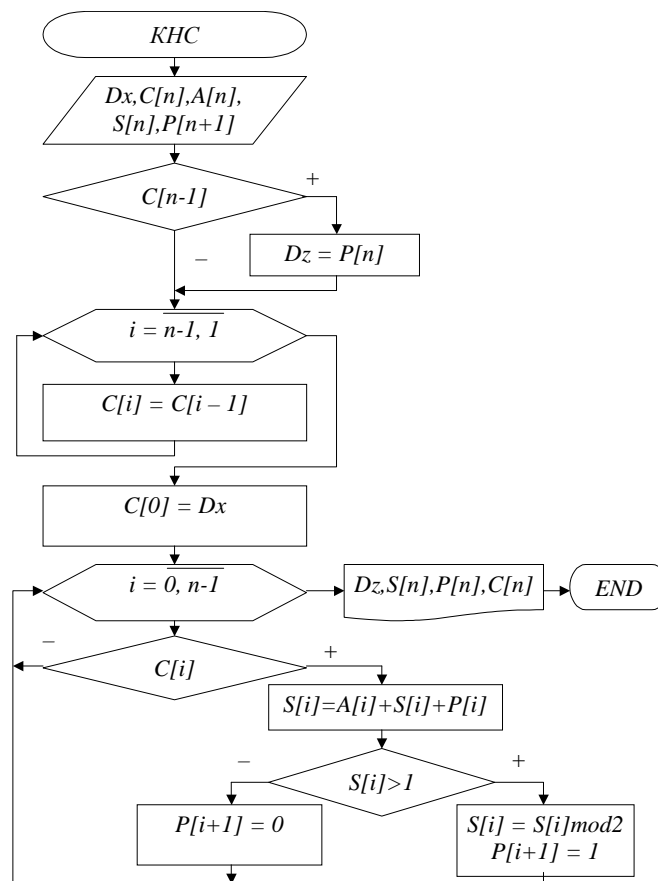


Рис. 4. Структура алгоритму імітаційного моделювання конвеєрного ЧІП

Модель конвеєрного число-імпульсного помножувача отримує з головної моделі конвеєрного ЧІФП дані про вміст конвеєрного нагромаджувального суматора, регістра зсуву, коефіцієнта множення, а також дані про міжрозрядні переноси. Ці дані подаються відповідними векторами  $S$ ,  $C$ ,  $A$ ,  $P$  розміру  $n$ . Передаються також дані про значення вхідного приросту число-імпульсного коду  $Dx$ . Якщо конвеєрний нагромаджувальний суматор переповнюється і у векторі  $C$  є інформація про наявність відповідного одиничного приросту вхідного число-імпульсного коду, модель відразу формує одиничне значення приросту вихідного число-імпульсного коду  $Dz$ . Далі моделюється зсув на один розряд в регістрі зсуву (всі  $i$ -ті коефіцієнти вектора  $S$  набувають значень  $i-1$ -х коефіцієнтів,

а нульовий коефіцієнт набуває значення вхідного приросту  $Dx$ ). Після цього у всіх розрядах моделі нагромаджувального суматора, яким відповідають одиничні значення вхідних приростів (які разом з нульовими значеннями містяться у векторі  $C$ ), відбувається підсумовування до попереднього значення цього розряду значення відповідного розряду коефіцієнта множення  $A$  і перенесення з попереднього розряду  $P$ . В результаті формуються нові значення розрядів нагромаджувального суматора і нові значення переносів. На цьому робота моделі закінчується, в основну модель повертаються значення приросту вихідного число-імпульсного коду, модифіковані вектори  $S$ ,  $P$ , та  $C$ .

Перевагою розглянутої моделі є можливість і простота втручання в роботу всіх основних вузлів на рівні окремих розрядів, що спрощує відпрацювання різних способів покращання точності конвеєрних ЧФП зі зворотними зв'язками. Недоліком такої моделі є її громіздкість і повільність роботи.

Для підвищення швидкості моделювання конвеєрних ЧФП було розроблено іншу модель конвеєрного ЧП. Структуру такої моделі подано на рис. 5. Моделями вмісту регістра зсуву, конвеєрного нагромаджувального суматора та множини значень переносів є цілі двійкові числа – відповідно  $C$ ,  $S$  та  $P$ . Модель спочатку моделює спрацювання регістра зсуву з одночасним переміщенням в його молодший розряд значення чергового вхідного приросту  $Dx$ . При такому моделюванні операція  $C \ll 1$  (рис. 5) позначає зсув двійкового числа  $C$  на один розряд ліворуч. Далі модель формує одиничне значення вихідного число-імпульсного коду, якщо числа  $C$  та  $P$  більші за встановлену розрядність помножувача. Одночасно ці числа приводяться до фіксованої розрядності перерахунком їх за модулем  $2^n$ . Після цього модель модифікує потрібні (на це вказують значення розрядів коду  $C$ ) розряди конвеєрного нагромаджувального суматора (число  $S$ ) та потрібні переноси (число  $P$ ). На цьому робота моделі закінчується.

Перевагою моделі, структуру якої подано на рис. 5, є її компактність і висока швидкість роботи. Вона не вимагає великого обсягу пам'яті, не виконує жодної арифметичної операції (виконуються тільки зсуви і побітові логічні операції, позначені на рис. 5 знаками “or” (АБО), “&” (І), “ $\oplus$ ” (додавання за модулем 2)). Недоліком такої моделі є складність втручання в її роботу на рівні окремих розрядів.

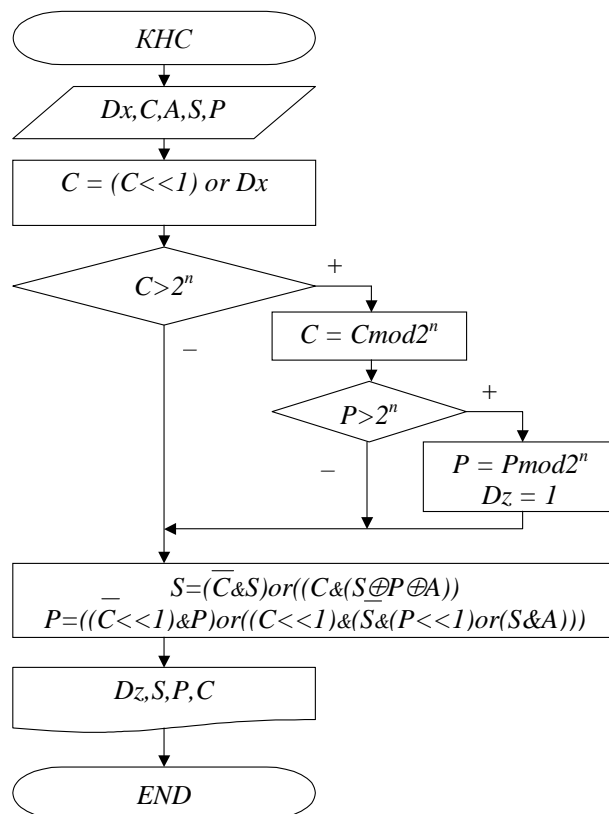


Рис.5. Структура алгоритму швидкого імітаційного моделювання конвеєрного ЧП

Розглянемо тепер імітаційні моделі конвеєрних лічильників. На рис. 6 подано структуру алгоритму, розроблену для імітаційного моделювання додавального конвеєрного лічильника. Подібно до алгоритму на рис. 4, вміст лічильника моделюється вектором  $A$  цілих коефіцієнтів розміру  $n$ . Вектором  $Z$  моделюється набір переносів з молодших розрядів лічильника (у цій моделі лічильник моделюється як послідовний нагромаджувальний суматор з одиницею або нулем на вході).

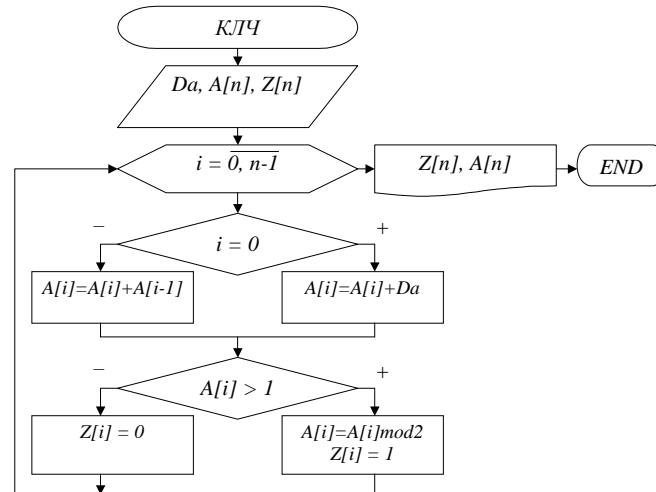


Рис.6. Структура алгоритму імітаційного моделювання конвеєрного лічильника

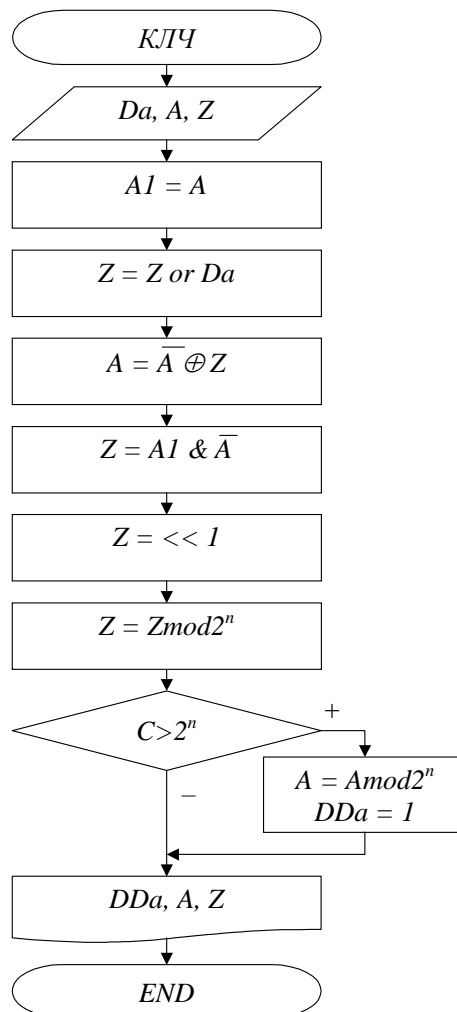


Рис.7. Структура алгоритму швидкого моделювання конвеєрного лічильника



$Da$  – вхідний приріст лічильника. В алгоритмі (рис. 6) до попереднього значення кожного розряду (крім молодшого) додається перенос з попереднього розряду. До значення молодшого розряду додається значення вхідного приросту лічильника  $Da$ . Якщо нове значення розряду більше за одиницю, воно перераховується за модулем 2 і формується одиничне значення переносу з цього розряду. В протилежному випадку формується нульове значення переносу. На виході алгоритму модифікований вектор  $A$  (вміст конвеєрного лічильника) і вектор переносів для наступного такту. Розглянутий алгоритм має ті самі переваги та недоліки, що і алгоритм на рис. 4. Перевага – можливість коригування роботи моделі на рівні окремих розрядів. Недолік – громіздкість та повільність моделі.

Для підвищення швидкості моделювання конвеєрних ЧФП було розроблено іншу імітаційну модель конвеєрного додавального лічильника. Структуру алгоритму такої моделі подано на рис. 7. На відміну від попередньої моделі, вміст конвеєрного лічильника та набір дозволів на перемикання розрядів лічильника моделюються цілими числами (відповідно  $A$  та  $Z$ ). Як і в моделі на рис. 6,  $Da$  – вхідний приріст лічильника. Алгоритм на рис. 7 передовсім запам'ятовує копію  $A1$  попереднього коду конвеєрного лічильника. Далі формується молодший розряд коду дозволів на перемикання розрядів  $Z$  (він набуває значення вхідного приросту лічильника  $Da$ ). Далі виконується логічна операція модифікування вмісту конвеєрного лічильника (модифікуються ті розряди, перемикання яких дозволено кодом  $Z$ ). Після цього за новим та старим значеннями вмісту лічильника формується новий код дозволів на перемикання розрядів для наступного такту роботи лічильника. Молодший розряд коду залишається вільним (він знову набуде значення  $Da$  на наступному такті). Нарешті коди  $A$  та  $Z$  приводяться до розрядності  $n$ . Якщо код  $A$  більший за цю розрядність, формується код переповнення  $DDa$ . На виході алгоритму (рис. 7) – модифіковані коди: вмісту лічильника  $A$  та дозволів на перемикання розрядів  $Z$ . Алгоритм, структура якого подана на рис. 7, є значно швидшим за модель на рис. 6. Разом з тим, модель на рис. 7 є незручною для відпрацювання способів покращання точності конвеєрних ЧФП зі зворотними зв'язками, оскільки складним є втручання в її роботу на рівні окремих розрядів.

Запропоновані моделі є основою імітаційного моделювання конвеєрних ЧФП. Результати роботи кожної з них збігаються з результатами роботи математичних моделей відповідних структурних елементів. Це підтверджує адекватність розроблених моделей. Що стосується імітаційного моделювання конвеєрних структур ЧФП загалом, то принципи їх моделювання не відрізняються від тих, які розроблені для класичних структур ЧФП [1, 2]. Необхідно сказати, що за відсутності імітаційних моделей конвеєрних структурних елементів ЧФП користувалися моделями класичних структурних елементів [2]. Натомість особливості формування вихідних приростів конвеєрними структурними елементами (наприклад, затримку) відображали в імітаційній моделі структури ЧФП. Це ускладнювало основну модель і її налагодження, сповільнювало її роботу, вимагало додаткових затрат пам'яті. Застосування розроблених імітаційних моделей дає змогу уникнути цих проблем.

## Висновки

Застосування запропонованих імітаційних моделей структурних елементів конвеєрних ЧФП сприяє вирішенню однієї з основних проблем конвеєрних ЧФП – погіршення точності при застосуванні зворотних зв'язків. Один із способів вирішення цієї проблеми – розроблення способів компенсації похибки, зумовленої затримкою сигналів зворотного зв'язку конвеєрними структурами. Розроблення та дослідження таких способів неможливе без імітаційних моделей конвеєрних структурних елементів. Застосування моделей класичних структурних елементів є недоцільним, оскільки такі моделі адекватно не відображають внутрішньої структури конвеєрного структурного елемента. Спроби врахувати особливості конвеєрного структурного елемента в головній моделі ЧФП призводять до надмірного ускладнення цієї моделі, складності її налагодження та перевірки, а тому часто є неадекватними і спричиняють неправильну імітацію роботи конвеєрної структури ЧФП. Запропоновано два варіанти імітаційних моделей основних конвеєрних структурних елементів ЧФП – конвеєрного нагромаджувального суматора та конвеєрного лічильника. Один з варіантів є швидшим, компактнішим і максимально близьким до внутрішньої будови структурного елемента. Інший варіант є повільнішим і громіздкішим, однак

зручнішим для дослідження способів покращання точності конвеєрних ЧФП зі зворотними зв'язками, оскільки передбачає можливість доступу до окремих розрядів вхідних, проміжних та вихідних кодів моделі.

1. Дудикевич В.Б. Число-імпульсні функціональні перетворювачі: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Львів, 1991. 2. Горпенюк А.Я. Реверсивні число-імпульсні функціональні перетворювачі: Автореф. дис. к-та техн. наук. – Львів, 1998. 3. Дудикевич В.Б., Максимович В.М. Оцінка сумісності число-імпульсних функціональних перетворювачів з пристроєм для квантування // Вісник ДУ “Львівська політехніка”. – № 283. – 1994. – С. 30–34.

УДК 621. 317

І.М. Бучма, Р.М. Щудлак  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматики та телемеханіки

## МЕТОДИ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ НЕЗРІВНОВАЖЕНИХ МОСТОВИХ І НАПІВМОСТОВИХ СХЕМ

© Бучма І.М., Щудлак Р.М., 2005

**Здійснено огляд методів лінеаризації характеристик вимірювальних мостових та напівмостових схем, призначених для перетворення параметрів пасивних елементів у напругу.**

**Review of methods for linearization characteristic of measuring Winston's and semiWinston's network means for processing parameters of passive elements to voltage are examined.**

### 1. Постановка задачі

Для вимірювання фізичних величин або їх зміни часто як первинні перетворювачі використовують пасивні давачі (резистори, тензорезистори, терморезистори, котушки індуктивності, ємності) [1–3]. Змінам фізичних величин відповідають пропорційні зміни параметрів пасивних давачів (на постійному струмі таким параметром завжди є опір, а на змінному – може бути опір, індуктивність, ємність). Щоб перетворити приріст параметра пасивного давача в напругу, його вмикають в схему чотириплечого моста або у напівмостову схему (дільник напруги). Мостова схема з ввімкненим у неї резистивним давачем та під'єднаним до її вихідної діагоналі диференціальним підсилювачем називається мостовим перетворювачем опору в напругу (ПОН) [4]. Як відомо, недоліком згаданих схем є нелінійна залежність вихідної напруги від змін параметрів давача. Тому цю залежність намагаються лінеаризувати [5–8].

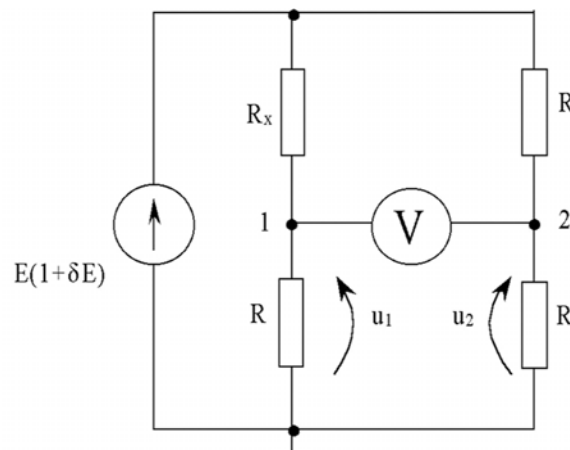


Рис. 1. Схема увімкнення резистивного давача в мостову схему