

ЛЬВІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

МАКСИМОВИЧ ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.317:681.325

ЧИСЛО-ІМПУЛЬСНІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
З ІМПУЛЬСНИМИ ЗВОРОТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Спеціальність 05.11.06. - Прилади і методи вимірювання
електричних і магнітних
величин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів 1993



00814809 (U)

Робота виконана у Львівському політехнічному інституті на кафедрі "Автоматика і телемеханіка" та у Львівському науково-дослідному радіотехнічному інституті

Науковий керівник:

доктор технічних наук, академік Міжнародної академії комп'ютерних наук і систем
В.Б.Дудикевич

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Я.М.Николайчук
кандидат технічних наук, доцент
М.М.Дорожовець

Провідне підприємство:

Інститут електродинаміки АН України

Захист дисертації відбудеться "25" серпня 1993р. о 14 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої ради Д068.36.04 при Львівському політехнічному інституті (290013, Львів, вул. Ст.Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Львівського політехнічного інституту (290013, Львів, вул. Професорська, 17).

Автореферат розісланий "24" травня 1993р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради,
кандидат технічних наук

Я.Т.Лущик

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ. Одна з істотних тенденцій розвитку виміривальної техніки полягає в тому, що попередня обробка інформації суміщується в часі з виміривальним перетворенням. При цьому в окремий ряд можна виділити ті засоби, у яких використовується число-імпульсний код (ЧІК). До таких засобів відносяться перетворювачі часового інтервалу, частоти і фази в код, перетворювачі постійної напруги і струму в код з проміжним перетворенням неперервної величини в послідовність імпульсів, деякі перетворювачі лінійних і кутових переміщень в код і т.і.

У процесі перетворення ЧІК у паралельний позиційний код він може бути підданий попередній обробці. Ця обробка не вимагає додаткового часу, тому що відбувається паралельно формуванню позиційного коду. Вона може містити масштабування, виконання елементарних математичних операцій, кусково-лінійні і кусково-нелінійні апроксимувачі перетворення. Перетворювачі, які здійснюють обробку ЧІК, у літературі найчастіше зустрічаються під назвою "число-імпульсні функціональні перетворювачі" (ЧІФП).

З позиції схемотехніки не існує істотних відмінностей між ЧІФП, розробленими для використання в виміривальних, керувачих, формувальних, обчислювальних та інших пристроях. Тому в тій чи іншій мірі розробкою ЧІФП займаються фахівці з різних галузей техніки. Великий внесок у розробку теорії ЧІФП зробили С.Н.Браго, О.С.Верзиков, О.О.Воронов, О.О.Горлач, В.С.Гутников, В.П.Данчев, В.В.Дудикевич, А.В.Калев, В.В.Карібський, Р.Г.Карпов, І.Ф.Клісторін, В.Г.Кюрінг, О.О.Мельников, М.Я.Мінц, П.В.Новицький, А.М.Оранський, Г.О.Паламерк, О.Г.Ривевський, Б.А.Сіров, В.В.Смолов, С.Ф.Трифонов, М.П.Цапенко, В.Д.Цаделко, В.І.Чинков, В.М.Швейцький, Л.В.Шлейко та їх учні.

Функціональне перетворення ЧІК може бути реалізоване як апаратними так і програмними засобами. В останньому випадку передбачається використання ЕОМ (міні ЕОМ, однокристальних ЕОМ, мікропроцесорів), що дозволяє досягти високих точностей обробки.

уніфікувати засоби. Але обмежені можливості у швидкодії і те, що ЕОМ, як універсальний засіб, має велику надлишковість при вирішенні конкретної задачі функціонального перетворення, спричинило інтенсивну розробку спеціалізованих апаратних чи апаратно-програмних перетворювачів інформації. Спеціалізовані і універсальні засоби не виключають, а навпаки доповнюють один одного.

В окрему групу можна виділити табличні функціональні перетворювачі: постійні запам'ятовувачі пристрої, арифметичні матриці, програмовані логічні матриці і т.і. Такі перетворювачі відносяться до найбільш швидкодіючих, але їх істотним недоліком є те, що із збільшенням кількості розрядів вхідного і вихідного кодів швидко ростуть апаратні затрати на організацію пам'яті (матриці).

Особливої уваги заслуговують ЧІФП, які можна віднести до типу цифрових аналогів. Такі перетворювачі поєднують простоту побудови аналогових пристроїв з високою точністю і надійністю цифрових. Основними структурними елементами цифрових аналогів є: інтегратор з паралельним переносом - нагромаджувач суматор (НС), інтегратор з послідовним переносом - двійковий помножувач (ДП), двійковий дільник (ДД). Теоретична база для створення цифрових аналогів була закладена К.Шенноном який довів, що будь-яка система звичайних диференціальних рівнянь з негіпертрансцендентними функціями може бути приведена до такого виду, який дозволяє вести рішення з допомогою тільки інтеграторів і суматорів.

В останній час були розроблені ЧІФП, які відносяться до цифрових аналогів і побудовані на базі ДП або НС, з використанням імпульсних додатних або від'ємних зворотних зв'язків. Такі перетворювачі вигідно відрізняються від традиційних додатковими функціональними можливостями, простотою побудови і, у багатьох випадках, високими метрологічними характеристиками. Однак створення ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками супроводжується значними складностями, без подолання яких не можливий їх дальший розвиток і широке практичне використання.

Метод роботи є аналіз метрологічних характеристик ЧІФП з

імпульсними зворотними зв'язками, розробка методики узагальненої оцінки їх ефективності, розробка структур ЧІФП з покращеними метрологічними характеристиками.

Роботи проводились згідно з координаційним планом науково-дослідних робіт МВО СРСР з проблеми в галузі технічної кібернетики на 1982 - 1985 р.р. (розділ "Інформаційні системи", проблема 4. "Теорія, принципи побудови і методи розрахунку елементів і пристроїв інформаційно-вимірвальних систем", підпроблема 4.5. "Розробка методів і систем функціонального перетворення інформації"), Постанова ДКНТ СРСР N 555 від 30 жовтня 1985 р. (Загально-союзна науково-технічна програма "Нові прилади") і з регіональних програм.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ. Згідно з постановою метов задачами дослідження є:

- розробка методики узагальненої оцінки ефективності ЧІФП;
- розробка аналітичного апарату для дослідження похибок перетворення ЧІФП, який би враховував особливості імпульсних зворотних зв'язків, і його використання для визначення похибок базових структурних елементів та ЧІФП на їх основі;
- розробка структур ЧІФП з покращеними метрологічними характеристиками і зокрема структур, що мають змінну (кервану) розрядність;
- пошук нових базових структурних елементів, які забезпечували б створення ЧІФП з додатковими функціональними можливостями, спрощеною структурою і покращеними метрологічними характеристиками.

НАУКОВА НОВИЗНА проведених досліджень така:

- розроблена методика узагальненої оцінки ефективності ЧІФП, в основі якої лежить співставлення похибки перетворення з трансформованою через ЧІФП похибкою квантування;
- розроблена методика дослідження похибок перетворення ЧІФП, яка враховує особливості від'ємного і додатного імпульсних зворотних зв'язків;
- отримані аналітичні вирази для максимальних значень похибок базових структурних елементів ЧІФП і деяких ЧІФП, які побудовані на їх основі;

- розроблені ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками і із змінною розрядністю, які мають покращені порівняно з відомими пристроями метрологічні характеристики;

- обґрунтована доцільність розширення набору базових структурних елементів, які використовуються при побудові ЧІФП, за рахунок включення до його складу помножувачів на базі нагромаджувачого суматора, обладнаних додатковими комбінаційним суматором або мультиплексором і виконувачих операцій помноження ЧІФП на дробовий коефіцієнт, чисельник і знаменник якого можуть задаватися незалежно один від одного.

ДОСТОВІРНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ. Достовірність отриманих результатів забезпечується коректністю постановки задач і математичних методів, які були використані для їх рішення, що підтверджується близькістю теоретичних викладок і результатів для створення пристроїв нової техніки.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РОБОТИ полягає в створенні інженерної методики проектування ЧІФП і дослідження їх характеристик, зокрема:

- розроблена методика узагальненої оцінки ефективності ЧІФП, дозволяє оцінювати сумісність ЧІФП з джерелом ЧІК, порівнювати ЧІФП з різними метрологічними характеристиками, проектувати ЧІФП з оптимальними для даного вимірювального засобу параметрами;

- розроблена методика дослідження похибок перетворення забезпечує визначення поточних і екстремальних значень цих похибок для базових структурних елементів і ЧІФП, побудованих на їх основі; отримані аналітичні вирази дозволяють розробляти ЧІФП з заданою точністю;

- розроблені ЧІФП з зворотними зв'язками і із змінною розрядністю забезпечують високу точність перетворення і мають велику швидкодію в широкому діапазоні значень вхідного ЧІК;

- включення в базовий набір нових структурних елементів дозволяє створювати ЧІФП, які відрізняються економною структурою і додатковими функціональними можливостями; на основі одного з нових базових елементів створено пристрій для керованої затримки

імпульсних сигналів, який використовується в складі імітаційно-вимірвального комплексу;

- впроваджені в складі вимірвальних засобів перетворювачі ЧК, частоти, фази мають підвищену точність і велику швидкодів в розширеному діапазоні значень вхідного ЧК;

- розроблені ЧК можуть бути реалізовані на сучасній елементній базі, у тому числі на великих інтегральних схемах, що зроблені на замовлення.

РЕАЛІЗАЦІЯ І ВПРОВАДЖЕННЯ. Основний зміст дисертаційної роботи складають результати досліджень, які були виконані автором самостійно на кафедрі "Автоматика та телемеханіка" Львівського політехнічного інституту і у Львівському науково-дослідному радіотехнічному інституті в період з 1978 по 1993 роки.

При участі автора розроблені та впроваджені:

1. Цифровий фазометр середнього значення зсуву фаз для широкого діапазону вхідних частот, захищений авторським свідоцтвом № 1420545. Фазометр впроваджений в розробках Вінницького політехнічного інституту.

2. Пристрій для керованої затримки імпульсних сигналів, побудований на основі цифрового нагромаджувача, який захищений авторським свідоцтвом № 1343411. Пристрій впроваджено в роботах Львівського науково-дослідного радіотехнічного інституту.

3. Цифровий інтенсиметр, який використовується як базовий пристрій при створенні професійних і побутових радіометричних засобів, дозиметрів, витратомірів і різного гатунку переліково-вимірвальних пристроїв, які працюють від давачів з імпульсним чи частотним виходом. Цифровий інтенсиметр захищений позитивним рішенням від 06.07.92 (Заявка номер 5025107/25) і авторським свідоцтвом № 1778716. Впроваджений у спільному виробництві малого підприємства "Метакс" та СКТБ "Орізон", місто Івано-Франківськ.

НА ЗАХИСТ ВНОСЯТЬСЯ:

- запропонована методика узагальненої оцінки ефективності ЧСД;

- запропонована методика дослідження похибок перетворення ЧСД і результати її використання;

- розроблені та досліджені нові структури ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками і із змінною (керуваною) розрядністю, які мають покращені порівняно з відомими пристроями метрологічні характеристики;

- запропонований і обґрунтований розширений набір базових структурних елементів, які використовуються при проектуванні ЧІФП, аналіз їх параметрів.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 3 Всесоюзних і I Республіканській науково-технічних конференціях і семінарах.

ПУБЛІКАЦІЇ З РОБОТИ. За темою дисертації опубліковано 43 роботи, у тому числі 28 винаходів.

СТРУКТУРА ДИСЕРТАЦІЇ. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків і переліку літератури.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У ВСТУПІ обґрунтована актуальність розробки методів аналізу метрологічних характеристик ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками та актуальність розробки їх структур з покращеними характеристиками.

У ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ проведений перелік основних метрологічних характеристик ЧІФП, їх класифікація за наявністю і характером імпульсних зворотних зв'язків, розроблена методика узагальненої оцінки ефективності ЧІФП.

ЧІФП, що входять до складу виміривальних засобів, повинні мати нормовані метрологічні характеристики, основними з яких є: помилка перетворення, швидкодія, діапазон входних і вихідних сигналів, функція перетворення. Однак окремо взяті характеристики не дають достатньо повної уяви про ефективність ЧІФП у цілому. Спроба вибору кращого варіанту ЧІФП відразу з декількох часткових показників звичайно не приводить до позитивного результату, так як покращення одного параметра часто супроводжується погіршенням якого-небудь іншого з них. Тому існує необхідність у розробці методики узагальненої оцінки ефективності ЧІФП.

При розробці такої методики для ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками необхідно враховувати їх специфіку. З цієї метов в роботі запропонована така класифікація.

До ЧІФП без зворотних зв'язків віднесемо пристрої, у яких вхідна імпульсна послідовність безпосередньо надходить на базову схему (БС).

До ЧІФП з від'ємним зворотним зв'язком (ВЗЗ) віднесено пристрої, у яких з вхідної послідовності віднімаються певні імпульси. Причому таке віднімання відбувається за командами в колі зворотного зв'язку. Згідно з цим визначенням ЧІФП з ВЗЗ може бути поданий як пристрій, у склад якого входять БС і схема віднімання (СВ).

До ЧІФП з додатним зворотним зв'язком (ДЗЗ) віднесено пристрої, у яких до вхідної послідовності додаються імпульси зворотного зв'язку, які повинні бути розміщені між вхідними імпульсами. Згідно з цим визначенням ЧІФП з ДЗЗ може бути поданий як пристрій, до складу якого входять БС і схема сумування (СС).

Приведена класифікація не є універсальною. Так, наприклад, в середині БС можуть бути додаткові зворотні зв'язки, що не дозволить чітко визначити, до якої з перерахованих груп належить ЧІФП. Однак дана класифікація дозволяє підкреслити деякі важливі особливості метрологічних характеристик ЧІФП з зворотними зв'язками.

Відомо, що основним недоліком ЧІФП з ВЗЗ є вузький діапазон перетворення за вхідним сигналом. Для більшості з них відношення максимального значення вхідного сигналу (кількості імпульсів) до його мінімального значення не перевищує двох. ЧІФП з ДЗЗ позбавлені цього недоліку. Проте, недоліком ЧІФП з ДЗЗ є швидкодія, що обумовлюється необхідністю розміщення імпульсів зворотного зв'язку між імпульсами вхідної послідовності. Причому, чим більше імпульсів зворотного зв'язку необхідно розмістити між імпульсами вхідної послідовності, тим меншу швидкодію буде мати ЧІФП.

Таким чином, запровадження в ЧІФП зворотних зв'язків загострює протиріччя між їх основними метрологічними

характеристиками: пристрої з більшою швидкістю мають вузький діапазон перетворення, а пристрої з широким діапазоном перетворення мають малу швидкість. Ця обставина підвищує актуальність розробки методики узагальненої оцінки ефективності ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками, нарівні з підвищенням актуальності створення структур, які б знімали вищезгадане протиріччя.

Ефективність ЧІФП не може бути оцінена без врахування його взаємодії з іншими вузлами виміривальних засобів. Так, як на вхід ЧІФП надходить ЧІК, то ЧІФП повинен розглядатися, в першу чергу, сумісно з джерелом ЧІК - пристроєм для квантування (ПК). Це обумовлено тим, що похибка і крок квантування повинні бути співставлені з похибкою і швидкістю ЧІФП.

Поряд з абсолютним значенням неперервної величини T_n , яка надходить на вхід ПК (рис. 1), доцільно розглянути її зведене значення

$$\Delta_n = \frac{T_n}{T_0}, \quad (1)$$

де T_0 - крок квантування. З врахуванням відомих виразів для похибки квантування

$$\Delta_k = \Sigma T_0 - T_n, \quad (2)$$

$$-T_0 < \Delta_k < T_0. \quad (3)$$

маємо

$$x - 1 \leq \Delta_k \leq x + 1. \quad (4)$$

Таким чином, загальну похибку послідовно з'єднаних ПК і ЧІФП можна подати як багатозначну дискретну функцію від x :

$$\Delta(x) = N_p(x) - F(\Delta_k), \quad (5)$$

де $N_p(x)$ - результат перетворення, F - функція, яку покликаний реалізувати ЧІФП.

З врахуванням виразу для похибки перетворення:

$$\Delta_{\Pi}(x) = N_p(x) - F(x), \quad (6)$$

отримаємо

$$\Delta(x) = \Delta_{\Pi}(x) + \Delta_{\text{тк}}(x), \quad (7)$$

де

$$\Delta_{\text{тк}}(x) = F(x) - F(A_n) \quad (8)$$

трансформована через ЧІФП похибка квантування. Трансформована похибка квантування чисельно дорівнює загальній похибці послідовно в'єднаних ПК і ідеального ЧІФП, тобто такого ЧІФП, похибка перетворення якого дорівнює нулю. Екстремальні значення $\Delta_{\text{тк}}(x)$ визначаються в залежності від функції перетворення. Так, наприклад, для монотонно зростаючих $F(x)$:

$$\Delta_{\text{ткmax}}(x) = F(x) - F(x-1), \quad (9)$$

$$\Delta_{\text{ткmin}}(x) = F(x) - F(x+1). \quad (10)$$

Співставлення залежностей $\Delta_{\text{тк}}(x)$ і $\Delta_{\Pi}(x)$ дозволяє оцінити ефективність ЧІФП при його підключенні до ПК і, таким чином, оцінити його ефективність у складі вимірювального засобу. При цьому основним критерієм повинна бути сумісність абсолютних значень $\Delta_{\Pi}(x)$, $\Delta_{\text{ткmin}}(x)$, $\Delta_{\text{ткmax}}(x)$ у всьому діапазоні значень x .

Для врахування при оцінці ефективності ЧІФП його швидкодії, приведені значення відносної неперервної величини T_n , подано так:

$$A_{\kappa} = \frac{T_{\kappa}}{T^*}, \quad (II)$$

де T^* - часовий інтервал, що характеризує швидкодiю ЧiФП. Під T^* звичайно розумiють максимальний час, який проходить вiд моменту надходження на ЧiФП вхiдного iмпульсу до моменту формування результату перетворення, або, що iнодi зручнiше, аналогiчний час для базової схеми ЧiФП.

Якщо ЧiФП працює на частотi $f_0 = 1/T_0$ вхiдних iмпульсiв, то коефiцiєнт

$$\beta = \frac{T_0}{T^*}, \quad (I2)$$

показує в скiльки разiв реальний темп роботи перетворювача поступаєтьсiя потенцiйним можливостям ЧiФП за швидкодiєю.

Якщо T^* - часовий iнтервал, що характеризує швидкодiю базової схеми ЧiФП, а максимально можлива частота роботи ЧiФП з iмпульсним зворотним зв'язком становить f_0 , то з допомогою коефiцiєнту β можна оцiнити втрати в швидкодiї ЧiФП при пiдключеннi зворотного зв'язку.

Якщо порiвнюютьсiя два ЧiФП i T^* - часовий iнтервал характеризуючий перший ЧiФП, що має бiльшу швидкодiю, а f_0 - максимально можлива частота роботи другого ЧiФП, то коефiцiєнт β показує в скiльки разiв другий ЧiФП поступаєтьсiя за швидкодiєю першому.

Таким чином, для всiх перелiчених випадкiв, величина β є вiдносною характеристикою швидкодiї ЧiФП.

У роботi доведено, що з врахуванням коефiцiєнту β загальна похибка послiдовно з'єднаних ПК i ЧiФП може бути подана так:

$$\Delta(\beta x) = \Delta_{\text{тк}}(\beta x) + \Delta_{\text{тп}}(\beta x), \quad (I3)$$

де $\Delta_{\text{тк}}(\beta x)$, як i ранiше, - трансформована через ЧiФП похибка квантування, а $\Delta_{\text{тп}}(\beta x)$ - трансформована похибка перетворення. Вплив коефiцiєнта β на обидвi складовi загальної похибки $\Delta(\beta x)$ пояснюєтьсiя тим, що величини T_{κ} i T_0 по сутi рiвноправними

Відносно послідовно з'єднаних ЧК і ЧФП (рис. 1) і, таким чином, обидві підпадають під функціональне перетворення.

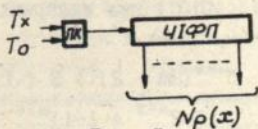


Рис. 1

Розроблена методика дозволяє знаходити значення $\Delta_{\text{ЧК}}(bx)$ і $\Delta_{\text{ЧФП}}(bx)$ для різних функцій перетворення. Таким чином, швидкодія ЧФП може бути врахована при узагальненій оцінці їх ефективності.

У ДРУГОМУ РОЗДІЛІ наведена розроблена автором методика дослідження похибок перетворення ЧФП, побудованих на базі ДП, і результати її використання.

Розроблена методика ґрунтується на розбитті множин значень вхідного, вихідного і проміжних ЧК на певні підмножини. Доцільність такого підходу обумовлена тим, що не існує єдиних рівнянь, які б описували процеси в ЧФП з імпульсними зворотними зв'язками для повної множини значень вищезгаданих ЧК. Розроблена методика ефективна для різних видів зворотних зв'язків і використовується також для дослідження ЧФП на базі НС, чому присвячений розділ 3 роботи.

З використанням розробленої методики були досліджені основні структурні базові елементи і деякі ЧФП, побудовані на їх основі.

Нижче наведені залежності максимального додатного і максимального від'ємного значень похибок перетворення від кількості розрядів m для ДП з ВЗЗ, а також значення керуваних кодів, при яких ці похибки мають місце.

При $3 \leq m \leq 6$:

$$y_{\max} = \begin{cases} 0101\dots0101 & \text{при парних } m, \\ 0101\dots01011 & \text{при непарних } m, \end{cases}$$

$$\Delta_{\max}^+ = \left| \Delta_{\max}^- \right| = \frac{1}{3} \times \frac{2^{m-1}(3m+4) + 2(-1)^{m+1}}{2^{m+2} + (-1)^{m+1}}. \quad (14)$$

При $7 \leq m \leq 13$:

$$y_{\max} = \begin{cases} 00101\dots01011 & \text{при парних } m, \\ 00101\dots0101 & \text{при непарних } m, \end{cases}$$

$$\Delta_{\max}^+ = \left| \Delta_{\max}^- \right| = \frac{1}{3} \times \frac{2^{m-1}(3m+1) + 4(-1)^m}{7 \cdot 2^{m-1} + (-1)^m}. \quad (15)$$

При $14 \leq m \leq 26$,

$$y_{\max} = \begin{cases} 000101\dots 0101 & \text{при парних } m, \\ 000101\dots 01011 & \text{при непарних } m, \end{cases}$$

$$\Delta_{\max}^+ = |\Delta_{\max}^-| = \frac{1}{3} \times \frac{2^{m-4}(3m-2) + 8(-1)^{m+4}}{13 \cdot 2^{m-2} + (-1)^{m+4}}. \quad (16)$$

Для ДП з ДЗЗ отримані такі результати.

При $5 \leq m \leq 11$:

$$y_{\max} = \begin{cases} 01101\dots 01011 & \text{при парних } m, \\ 01101\dots 0101 & \text{при непарних } m, \end{cases}$$

$$\Delta_{\max}^+ = |\Delta_{\max}^-| = \frac{1}{3} \times \frac{2^{m-1}(3m-3,5) + 5(-1)^{m+1}}{7 \cdot 2^{m-2} + (-1)^{m+1}}. \quad (17)$$

При $12 \leq m \leq 24$:

$$y_{\max} = \begin{cases} 011101\dots 0101 & \text{при парних } m, \\ 011101\dots 01011 & \text{при непарних } m, \end{cases}$$

$$\Delta_{\max}^+ = |\Delta_{\max}^-| = \frac{1}{3} \times \frac{2^{m-2}(3m-5,75) + 13(-1)^m}{13 \cdot 2^{m-2} + (-1)^m}. \quad (18)$$

Результати дослідження похибок перетворення для пристроїв з ДЗЗ наведені для завершених рециркуляційних процесів у колі зворотного зв'язку. У деяких випадках необхідно визначати похибку перетворення в процесі рециркуляції, тобто з кожного чергового вихідного імпульсу. Результати такого дослідження містяться також у другому розділі роботи.

У роботі приведені результати моделювання на ЕОМ ДП з різними зворотними зв'язками. При цьому виявлено, що розподіл їх похибок має однаковий характер для різних кількостей розрядів, що дозволяє без додаткових застережень використовувати вирази для максимальних похибок перетворення.

Результати дослідження похибок, що приведені вище, стосуються пристроїв, які працюють у статичному режимі, тобто при фіксованих керуючих кодах. Розроблена методика дослідження похибок перетворення може бути також використана для деяких пристроїв, які працюють у динамічному режимі. У роботі це твердження проілюстроване результатами дослідження квадратора на ДП.

У більшості випадків не вдається винятково аналітичними методами дослідити похибки перетворення ЧІФП, що працюють у динамічному режимі, і доводиться використовувати засоби обчислювальної техніки. У зв'язку з цим необхідно підкреслити такі обставини. Характеристики ЧІФП, задіяних у статичному режимі, так само можуть бути досліджені шляхом моделювання на ЕОМ. Однак, як показано в роботі, у цьому випадку можливості ЕОМ обмежені. Це пояснюється тим, що кожному значенню коду в лічильнику ДП відповідає повна множина можливих значень керуючого коду і, таким чином, при збільшенні розрядності такого ЧІФП різко збільшується необхідний машинний час. У ЧІФП, які працюють у динамічному режимі, кожному значенню коду в лічильнику ДП, як правило, відповідає одне або декілька чисел у керуючому лічильнику і, отже, при збільшенні розрядності такого пристрою необхідний машинний час збільшується не так швидко.

Таким чином, моделювання на ЕОМ є основним способом дослідження метрологічних характеристик ЧІФП, що працюють у динамічному режимі. У роботі приведена методика отримання рекурентних рівнянь, які спрощують процес моделювання ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками.

У ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ приведена розроблена автором методика дослідження похибок перетворення ЧІФП, побудованих на базі ІНС, і результати її використання. Приведені також методи підвищення точності таких ЧІФП.

Відомо, що функція помноження вхідного ЧІК на паралельний код, нарівні з ДП, виконує також помноження на нагромаджуєчому суматорі (ІНС). Причому імпульси в вихідній послідовності ІНС, що працює в статичному режимі, розташовані рівномірніше ніж імпульси в вихідній послідовності ДП. Тому похибки перетворення ЧІФП,

побудованих на базі НС, як правило, суттєво менші за похибки аналогічних пристроїв, побудованих на базі ДП.

При дослідженні похибок ЧІФП, побудованих на базі НС, була використана та сама методика розбиття множин значень вхідного, вихідного і проміжних ЧІК на певні підмножини, що і в попередньому розділі. При цьому було виявлено, що екстремальні значення похибок перетворення в значній мірі залежать від початкової установок регістрів НС. Ця обставина має особливо великий вплив на точність ЧІФП з ДЗЗ. Таким чином, правильний вибір початкової установок елементів пам'яті ЧІФП, побудованих на базі НС, дозволяє суттєво зменшити похибку перетворення.

У роботі одержані співвідношення, з допомогою яких можна визначати поточні і екстремальні значення похибок перетворення базових елементів і деяких ЧІФП на їх основі в залежності від значень вхідного ЧІК, керувачих кодів, початкових установок елементів пам'яті і кількості розрядів.

Для конкретних значень початкових установок R отримані такі результати.

Похибка перетворення ПНС з ВЗЗ при $R = \frac{I}{2} \cdot 2^m$ (m - кількість розрядів) лежить у межах:

$$- 0.5 < \Delta < 0.75. \quad (19)$$

Для ПНС з ДЗЗ при $R = 2^m - I$

$$0 < \Delta < I. \quad (20)$$

Для ПНС з модифікованим ДЗЗ при $R = y$ (y - керувачий код)

$$0 < \Delta < I. \quad (21)$$

Результати дослідження похибок перетворення для пристроїв з ДЗЗ приведені для завершених рециркуляційних процесів у колі зворотного зв'язку.

При моделюванні на ЕОМ ПНС без зворотного зв'язку і ПНС з різними зворотними зв'язками виявлено, що, так само як і для схем на базі ДП, розподіл їх похибок перетворення має однаковий характер для різних кількостей розрядів.

З допомогою розробленої методики аналітичного дослідження, визначені оптимальні значення початкових установок і екстремальні

значення похибок перетворення для наступних ЧФП: помножувача ЧК на n чисел (n послідовно з'єднаних ПНС); помножувача ЧК на дробовий коефіцієнт (послідовно з'єднані ПНС і ПНС з ВЗЗ); нових базових елементів ЧФП, використання яких розглядається в четвертому розділі роботи; квадратора. Приведені приклади доводять ефективність розробленої методики для ЧФП, що працюють у статичному режимі і для деяких ЧФП, які працюють у динамічному режимі. При цьому для останніх основним методом дослідження метрологічних характеристик є моделювання їхньої роботи на ЕОМ. Це пояснюється такими ж аргументами, які були приведені вище для перетворювачів на базі ДП.

У роботі доведено, що для ПНС з ВЗЗ і ПНС з ДЗЗ використання в коді результату перетворення поточного значення числа в регістрі НС приводить до істотного зменшення похибки перетворення. При цьому необхідна установка певних початкових чисел у регістрі НС, а для ПНС з ВЗЗ необхідне також використання в коді результату перетворення стану тригера, що міститься в СВ (рис. 2).

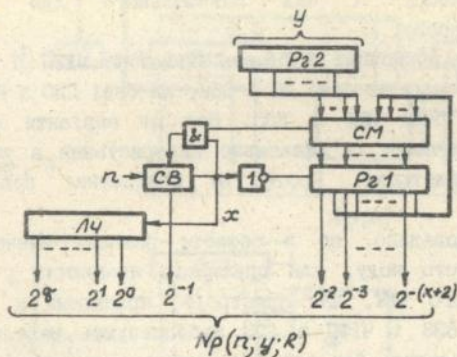


Рис. 2

В ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ обґрунтований принцип багатоваріантності побудови ЧФП з імпульсними зворотними зв'язками, приведені розроблені ЧФП із змінною розрядністю, описані нові базові пристрої і ЧФП на їх основі.

За останній час опубліковано декілька робіт, у яких приводяться методи і результати створення структур ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками. Проте в цих роботах є суттєві недоліки. По-перше, через відсутність математичного апарату, аналіз похибок перетворення ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками проводиться тільки для окремих пристроїв чи в спрощеному виді. По-друге, похибка перетворення ЧІФП не співставляється з похибкою квантування і функцією перетворення, що не дозволяє оцінити можливість ефективного використання ЧІФП у вимірювальних засобах.

Методика дослідження похибок перетворення ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками і результати її використання, приведені в попередніх розділах роботи, дозволяють значно усунути вище згадані недоліки. При цьому відкривається можливість нового підходу до проблеми синтезу ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками, зокрема, до розгляду різних варіантів ЧІФП, реалізуючих одну й ту саму функцію, і вибору з них оптимального для конкретного вимірювального засобу.

Існує чотири основних варіанти побудови ЧІФП з імпульсними зв'язками: на базі ДП з ВЗЗ, на базі ПНС з ВЗЗ, на базі ДП з ДЗЗ і на базі ПНС з ДЗЗ. Всі ці варіанти мають певні переваги, що сприяє їх ефективне використання в тих чи інших вимірювальних пристроях. Проте їм притаманні певні спільні недоліки.

У роботі доведено, що в області великих значень вхідної величини (керуючого коду, для пристроїв працюючих у статичному режимі, і вхідного ЧІК, для пристроїв, працюючих у динамічному режимі) ЧІФП з ВЗЗ і ЧІФП з ДЗЗ забезпечують невеликі похибки перетворення і працюють без істотних втрат у швидкодії. В області малих значень вхідних величин ЧІФП з ВЗЗ не функціонують, а ЧІФП з ДЗЗ мають малу швидкодію. Розмежування значень вхідних величин на вище згадані області визначається функцією перетворення і розрядністю пристроїв.

Відомі роботи з розробки ЧІФП, у яких базовим елементом, на рівні з ДП та ПНС, використовується ДД. Поєднання в одному пристрої ДД і ДП або ДД і ПНС дозволяє розширити діапазон значень вхідного ЧІК, у якому ЧІФП забезпечує обробку без суттєвих втрат точності перетворення і швидкодії.

Автором був розроблений ряд ЧІФП із змінною розрядністю, які за своїми метрологічними характеристиками перевищують існуючі пристрої, у тому числі і пристрої у структурі яких введено ДД. Принцип дії пристроїв з перемінною розрядністю заключається в тому, що кількість розрядів структурних елементів ЧІФП, задіяних у їх роботі (на заблокованих відповідним чином керувачими сигналами), залежить від значення чисел, які містяться в керувачих регістрах чи лічильниках. У роботі приведені такі перетворювачі з перемінною розрядністю: ділянки ЧІК на паралельний код, пристрій для реалізації функції кореня квадратного з вхідного ЧІК (рис. 3), пристрій для реалізації функції натурального логарифма з вхідного ЧІК (рис. 4). ЧІФП з перемінною розрядністю можуть бути реалізовані на базі ДД чи ПНС з використанням ВЗЗ чи ДЗЗ.

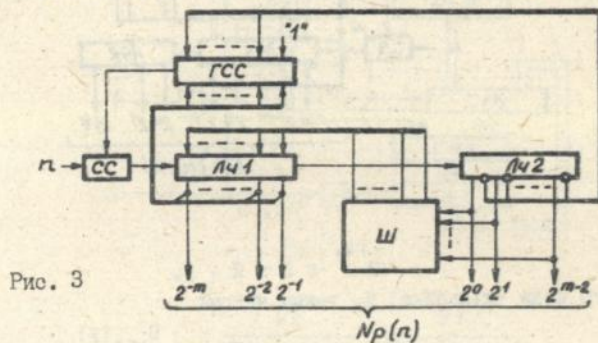


Рис. 3

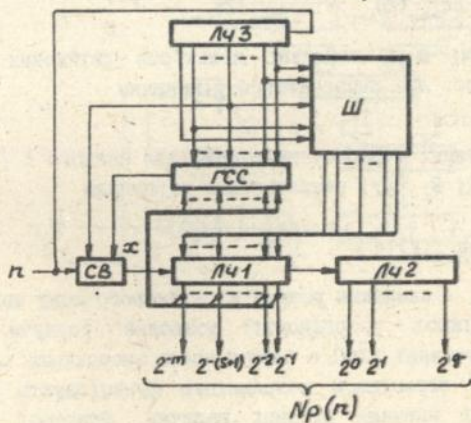


Рис. 4

перемінної розрядності у всьому діапазоні можливих значень вхідних величин працюють без втрат швидкодії, так як кожний вхідний імпульс викликає не більше одного імпульсу в колі ДЗЗ.

Всі розглянуті варіанти ЧІФП з перемінною розрядністю забезпечують високу точність перетворення, однак, із збільшенням загальної кількості розрядів, перевагу необхідно віддати пристроям на базі ПНС.

Введення в склад ПНС, у першому випадку, мультиплексора 1, у другому випадку, другого комбінаційного суматора і комутатора, а також відповідні зміни зв'язків між функціональними елементами, дозволили створити нові базові пристрої ЧІФП (рис. 6, 7).

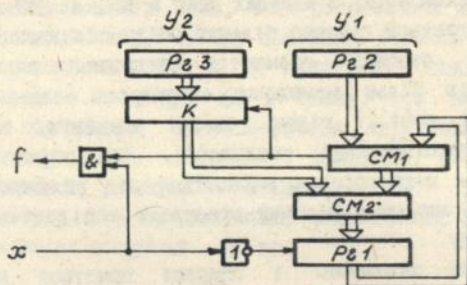


Рис. 6

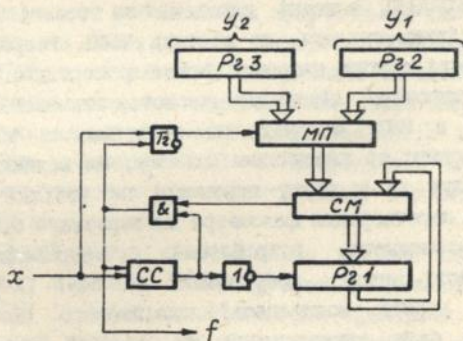


Рис. 7

Ефективність використання нових базових елементів і ЧІФП, побудованих на їх основі, пояснюється таким чином. Функція

$$f = \frac{y_1}{2^m - y_2} x, \quad (26)$$

яку реалізують нові базові пристрої (y_1 і y_2 - значення керувачих кодів, x - значення вхідного ЧІК, m - кількість двійкових розрядів) може бути також реалізована з допомогою відомих пристроїв: послідовно з'єднаних ПНС і ПНС з ДЗЗ. Однак у цьому випадку вимагається суттєво більший об'єм обладнання. Тому ЧІФП на базі нових базових елементів відрізняється від відомих перетворювачів більш економічною структурою. Якщо ж порівнювати окремо взяті нові і відомі базові елементи, то перші мають додаткові функціональні можливості. Це обумовлено тим, що коефіцієнт їх перетворення змінюється під впливом двох керувачих кодів, у той час як у відомих пристроях - під дією тільки одного керувачого коду.

У роботі приведені і описані пристрої для реалізації гіперболічної, степеневої і експоненціальної функцій, створені на новій базі.

У П'ЯТОМУ РОЗДІЛІ описані виконані на основі проведених теоретичних досліджень прилади, що містять ЧІФП. Розроблений при безпосередній участі автора цифровий фазометр середнього значення зсуву фаз для широкого діапазону частот, виконаний на базі І9-розрядного ДП з ВЗЗ. Фазометр не поступається за точністю приладам, які виконані за класичними схемами, на великих частотах і значно перевершує їх у цьому параметрі на низьких частотах. Абсолютна похибка перетворення фазометра не перевищує $0,004^\circ$.

Цифровий інтенсиметр, розроблений і впроваджений при безпосередній участі автора, побудований на базі І2-розрядного (8-розрядного в першій модифікації) двійкового ПНС з ДЗЗ. Інтенсиметр може бути використаний як базовий пристрій при створенні професійних і побутових радіометричних приладів, дозиметрів, витратомірів і різного ґатунку

переліково-вимірвальних пристроїв, що працюють від датчиків з імпульсним чи частотним виходом. У даний час на основі цифрового інтенсиметра випускаються радіометри для вимірювання потужності експозиційної дози гамма і бета випромінювання, що мають такі характеристики: діапазон вимірювання потужності експозиційної дози (ПЕД) - (0,01 - 100,0) мР/г; межа основної відносної похибки визначення ПЕД при градуїровці за Cs-137, при надійній імовірності 0,96 - (± 25)%; часові інтервали вимірювання - (1, 10, 100) с.

Пристрій для керованої затримки імпульсних сигналів використовується в складі імітаційно-вимірвального комплексу. Один з нових базових елементів ЧІФП, який розроблений автором і описаний у даній роботі, складає основу пристроїв. Основна перевага розробленого пристроїв в порівнянні з пристроями аналогічного призначення заключається у тому, що в ньому, при незначному збільшенні об'єму обладнання, забезпечується керування кроком перестройки швидкості зміни затримки. Пристрій забезпечує перестройку швидкості зміни затримки в діапазоні (14,06 - 3600) мкс/год; 256 значень кроку перестройки швидкості зміни частоти; крок зміни затримки - 20 нс.

В И С Н О В К И

Основні результати роботи можна сформулювати так:

1. Обґрунтована необхідність: створення узагальненої оцінки ефективності ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками; розробки методики дослідження похибок перетворення таких перетворювачів; аналізу точніших характеристик базових елементів і ЧІФП на їх основі; розробки структур ЧІФП з покращеними метрологічними характеристиками; розробки розширеного набору базових структурних елементів і ЧІФП на їх основі.

2. Розроблений метод співставлення похибки перетворення з трансформованою похибкою квантування, дозволяє оцінити ефективність ЧІФП у складі вимірвальних пристроїв, порівнювати пристрої з різними метрологічними характеристиками і проектувати ЧІФП з оптимальними для даного пристроїв параметрами. При цьому на

рівні з похибкою перетворення враховуються і інші основні характеристики ЧІФП: функція перетворення, швидкодія і діапазон перетворення.

3. Розроблений аналітичний метод, що ґрунтується на розбитті множин значень вхідного, вихідного і проміжних ЧІК на певні підмножини, у межах яких кількісні параметри ЧІК описуються єдиними рівняннями, дозволяє ефективно досліджувати похибки перетворення ЧІФП, які працюють у статичному режимі і деяких ЧІФП, які працюють у динамічному режимі.

4. У результаті застосування розробленого методу отримані рівняння, які дозволяють точно визначити поточні і екстремальні похибки ДП і ПНС з ВЗЗ чи ДЗЗ і деяких ЧІФП на їх основі. Отримані рівняння можуть бути також використані для розробки ЧІФП з оптимальною кількістю розрядів.

5. Доведено, що для ЧІФП, працюючих у динамічному режимі основним методом дослідження метрологічних характеристик є моделювання на ЕОМ. Отримані рекурентні рівняння спрощуть процес моделювання.

6. Використання фізичного значення числа в НС і вибір оптимальних початкових установок елементів пам'яті дозволяють суттєво підвищити точність деяких ЧІФП на базі УНС.

7. Розроблені і досліджені ЧІФП з імпульсними зворотними зв'язками і із змінною (керованою) розрядністю забезпечують високу точність і велику швидкодію в широких діапазонах значень вхідних величин. При порівняно великій кількості розрядів (більше десяти) перевагу необхідно віддати пристроям на базі НС, тому що при цій умові вони забезпечують менші похибки перетворення.

8. Введення в склад УНС, у першому випадку, мультиплексора і, у другому випадку, другого комбінаційного суматора і комутатора, а також певні зміни зв'язків між функціональними елементами, дозволило створити нові базові пристрої ЧІФП, які виконують операцію помноження ЧІК на дробовий коефіцієнт, чисельник і знаменник якого можуть задаватися незалежно один від одного. З використанням нових базових пристроїв можливе створення ЧІФП з економною структурою і додатковими функціональними можливостями.

9. На основі виконаних теоретичних досліджень практично реалізовані і впроваджені в виробництво такі вимірвальні перетворювачі: цифровий фазометр середнього значення зсуву фаз, цифровий інтенсиметр, пристрій для керуваної затримки імпульсних сигналів.

Економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи складає 50 тис.крб. в цінах 1989 року.

Основний зміст проведених досліджень викладений в таких роботах.

1. Максимович В.Н. Быстродействующие функциональные преобразователи для цифровых измерительных систем // Контрольно-измерительная техника. - Львов, 1979. - Вып.26. -с.47-53.

2. Максимович В.Н. Применение решетчатых функций для расчета измерительных цифро-частотных функциональных преобразователей // Контрольно-измерительная техника. - Львов, 1981. -Вып.30. -с.32-37.

3. Максимович В.Н. Определение погрешностей делителей частоты с цифровыми обратными связями на основе двоичного умножителя // Контрольно-измерительная техника. - Львов, 1982. - Вып.31. -с.41-48.

4. Максимович В.Н. О расчете измерительных цифро-частотных функциональных преобразователей на основе делителей частоты с цифровой обратной связью // Контрольно-измерительная техника. - Львов, 1982. -Вып.31. -с.48-54.

5. Максимович В.Н. Цифрочастотный делитель повышенной точности на базе накапливающего сумматора с отрицательной обратной связью // Контрольно-измерительная техника. - Львов, 1985. -Вып.38. -с.27-34.

6. Максимович В.Н., Дудкевич В.Б. Определение максимальной погрешности делителя частоты с положительной цифровой обратной связью. -М., 1982. -15с. - Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения, № 1941-пр.-ДВ2.

7. Максимович В.Н., Дудкевич В.Б. Определение максимальной погрешности делителя частоты с отрицательной цифровой

обратной связью. -М., 1982.. -14с. - Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения, № 1942-пр.-Д82.

8. Максимович В.Н., Дудкевич В.Б. Определена максимальная погрешности делителя частоты с комбинированной обратной связью. -М., 1982. -22с. - Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения, № 1943-пр.-Д82.

9. Максимович В.Н., Дудкевич В.Б. Определение максимальной погрешности квадратора на двоичном умножителе. -М., 1983. -15с. - Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения, №2237-пр.-Д83.

10. Дудкевич В.Б., Максимович В.Н. Определение погрешностей делителей частоты на базе интегратора с параллельным переносом. -М., 1984. -27с. - Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения, № 2342-пр.-Д84.

11. Дудкевич В.Б., Максимович В.Н. Анализ точности умножителя и квадратора на основе интегратора с параллельным переносом. - М., 1984. -13с. - Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения, № 2343-пр.-Д84.

12. Дудкевич В.Б., Максимович В.Н. Цифро-частотные делители повышенной точности на базе накапливающего сумматора с положительной обратной связью. М., 1985. -19с. - Деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения, № 2836-пр.-Д85.

13. Дудкевич В.Б., Максимович В.Н. Исследование измерительных преобразователей на базе цифровых интеграторов с обратными связями // Измерительные информационные системы: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. - Винница, 1985. -с.188-189.

14. Дудкевич В.Б., Максимович В.Н. Повышение точности измерения цифровых фазометров среднего значения сдвига фаз //Современные проблемы фазоизмерительной техники и ее применение: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. - Красноярск, 1989. - с.8.

15. Дудкевич В.Б., Максимович В.Н. Оценка эффективности специализированных процессоров число-импульсных кодов в составе измерительно-вычислительных систем // Диагностика и коррекция погрешностей преобразователей технологической информации: Тез. докл. Респ. научн.-техн. конф. - Киев, 1989. - с.98-99.

16. Вычислитель степенных функций: А.С. 759164 СССР, МКИ G06F 15/31 /В.Б.Дудкевич, В.Н.Максимович (СССР). -3с.

17. Устройство для измерения скважности прямоугольных

импульсов: А.С. 783658 СССР, МКИ G01R 23/00 /В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -2с.

18. Устройство для дифференцирования частотно-импульсных сигналов: А.С. 862150 СССР, МКИ G06G 7/18 /В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -3с.

19. Скользиметр: А.С. 881620 СССР, МКИ G01P 3/65 /В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -3с.

20. Устройство для определения характеристики случайных процессов: А.С. 932503 СССР, МКИ G06F 15/36 /В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -7с.

21. Устройство для вычисления обратных тригонометрических функций: А.С. 964633 СССР, МКИ G06F 7/548 /В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -5с.

22. Цифровой инфранизкочастотный фазометр-частотомер: А.С. 1105826 СССР, МКИ G01R 25/00 /В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -4с.

23. Скользиметр: А.С. 1269030 СССР, МКИ G01P 3/66 /В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -4с.

24. Устройство для извлечения квадратного корня: А.С. 1290309 СССР, МКИ G06F 7/552 // В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -2 с.

25. Делитель частоты с переменным коэффициентом деления: А.С. 1298908 СССР, МКИ H03K 23/66 /В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -4 с.

26. Устройство для вычисления экспоненциальной функции: А.С. 1309043 СССР, МКИ G06F 7/556 /В.В.Дудыкевич, О.Е.Котляков, В.Н.Максимович (СССР). -3 с.

27. Цифровой накопитель: А.С. 1343411 СССР, МКИ G06F 7/556 /В.Н.Максимович, В.В.Дудыкевич (СССР). -3 с.

28. Логарифмический преобразователь: А.С. 1381498 СССР, МКИ G06F 7/556 /В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -7 с.

29. Устройство для извлечения квадратного корня: А.С. 1388856 СССР, МКИ G06F 7/552 /В.В.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -7 с.

30. Частотно-импульсное пересчетное устройство: А.С. 1406754

СССР, МКИ НОЗК 5/156, 23/00 /Я.А.Васильев, В.Б.Дудыкевич, В.Н.Максимович, В.П.Токарчук (СССР). -6 с.

31. Цифровой фазометр: А.С. I420545 СССР, МКИ GOIR 25/00 /В.Б.Дудыкевич, В.Н.Максимович, Д.В.Опотяк, В.Я.Сушнян, С.Н.Горбатиц (СССР). -6с.

32. Устройство для деления: А.С. I437982 СССР, МКИ НОЗК 5/156, G 06 F 7/52 /В.Б.Дудыкевич, В.Н.Максимович (СССР). -4 с.

33. Цифровой интенсиметр: А.С. I778716 СССР, МКИ GOIT I/16 /И.К.Радутный, Д.Б.Сторонский, В.Н.Максимович, В.Б.Дудыкевич, Б.Г.Озеров (СССР). -3с.

Підп. до друку 20.05.93. Формат 60x84¹/16
Папір друк. № 2. Офс. друк. Умовн. друк. арк. 1.76
Умовн. фарб.-відб. 1.78 Умовн. видав. арк. 1.62
Тираж 100 прим. Зам. 100. Безплатно

ЛПІ 290646 Львів-13, Ст.Бандери, 12

Дільниця оперативного друку ЛПІ
Львів, вул. Городоцька, 286

AB 27.66

AB 27.667