

3. Інтернет-сайт компанії Еріксон [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ericsson.com>.
4. Інтернет-сайт компанії Сіменс [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.siemens-mobile.ru>.
5. Інтернет-сайт компанії Самсунг [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.samsung.ru>.
6. Інтернет-сайт компанії Ел-джи Електронікс [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.lg.ru>.
7. Інтернет-сайт компанії Eline [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.e-line.ru>.
8. Інтернет-сайт московської компанії Елст [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.elst.ru>.
9. Інтернет-сайт «DECT Forum» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.dect.ch>.

Надійшла 17.9.2010 р.

УДК 621.321

Л. В. ТРОЦИШИНА
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕТОДИЧНИХ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ПОХИБОК НА ПРОЦЕС ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ЦИФРОВИМИ ЧАСТОТОМІРАМИ

Стаття присвячена детальному розгляду механізму утворення методичних та інструментальних похибок вимірювання частоти у цифрових частотомірах. Детально розглянуто отримання виразів для похибок вимірювання частоти. Вказано на методи їх зменшення або усунення.

This article is devoted to detailed consideration of the mechanism of methodological and instrumental errors in measuring the digital frequency. Considered in detail for receiving expressions you often measurement errors. The specified methods for their reduction or elimination.

Ключові слова: Ключові слова: частота, вимірювання, методична похибка, інструментальна похибка.

Вступ

Теоретичні засади задач радіолокації, радіонавігації, радіоастрономії, технологій та засобів телекомунікацій, а також томографії вказують на доцільність вимірювання частоти високочастотних радіоімпульсних сигналів із максимально можливою точністю та швидкодією, а також в умовах невизначеності часу існування такого сигналу. Швидка і якісна ідентифікація об'єкта за значенням частоти відбитого сигналу є однією із задач радіолокації, радіоастрономії, радіонавігації, зокрема систем автопілотування, що дасть можливість вчасно на нього відреагувати і прийняти відповідне рішення, особливо в системах ПРО, де вказані параметри є визначальними.

Проте аналіз вітчизняної та іноземної науково-технічної літератури і патентний пошук показав, що на сьогодні ці задачі вирішуються шляхом модернізації класичних методів цифрового вимірювання частоти, які різними схемотехнічними та математичними методами намагаються зменшити притаманну їм похибку дискретності, яка залежить від часу вимірювання. [1–3, 5, 6, 8].

В той же час існують, інші неklasичні підходи до процедури вимірювання частоти з позицій теорії Фазочастотних вимірювань та перетворень радіосигналів (ФЧВ і ПР), які вказують на принципову можливість значно покращити проблемний параметр: *точність вимірювання × швидкодія вимірювання* саме для частоти радіосигналів [4, 12–14].

Однак, питання інструментальних можливостей роздільної здатності апаратури є тією технічною межею, якої можливо досягнути при реалізації вимірювача частоти за методом коінциденції, потребує більш детального аналізу та дослідження. Незважаючи на величезну кількість методів та способів вимірювання частоти, які здатні забезпечувати як широкий частотний діапазон, так і високу точність вимірювання, питання одночасного підвищення як точності так і швидкодії, для потреб сьогодення не вирішені, навіть такими потужними методами, якими є цифрові [2, 5, 6].

Фактори, що визначають точність часових вимірювань є властивостями та особливостями побудови і роботи електронних схем формування сигналів [3, 8,].

Метою статті є проведення детального дослідження механізмів виникнення та способів усунення методичних та інструментальних похибок притаманних саме класичній цифровій частотометрії.

Об'єкт дослідження є процес цифрового вимірювального перетворення.

Предмет дослідження – аналіз методичних і інструментальних похибок вимірювального перетворення частоти в класичних цифрових частотомірах.

Результати дослідження

Серед цифрових приладів частотно-часової групи електронно-лічильні частотоміри (надалі цифрові частотоміри – ЦЧ) є найбільш поширеними, що пояснюється їх універсальністю, високими метрологічними і експлуатаційними характеристиками.

В основу побудови ЦЧ покладені загальні принципи, що дозволяють реалізувати ряд режимів

роботи приладу для вимірювання кількох величин. Функціонально повні ЦЧ дозволяють вимірювати наступні величини: частоту, період, відношення двох частот (іноді виражене у відсотках), тривалість імпульсу або інтервалу часу, що задається користувачем; передбачаються також режим рахунку подій (імпульсів) і використання ЦЧ як джерела сигналів з відомими (каліброваними) частотами. Режими роботи задаються і вибираються станом низки перемикачів (механічних або електронних) та інших органів управління. У простіших варіантах виконання ЦЧ використовуються для вимірювання меншого числа величин (наприклад, однієї або двох) [3, 5, 6].

У кожному режимі частина структури ЦЧ залишається незмінною і в ній відбувається рахунок числа імпульсів, пропорційного вимірюваній величині. Ці імпульси проходять через електронний ключ ЕК, що знаходиться в замкнутому стані, на лічильник імпульсів ЛІ. Код числа, що утворюється в ЛІ, надходить на цифровий відліковий пристрій ЦВП. До складу ЦВП входить багатodeкадний цифровий індикатор із переміщеннями коми і, як правило, індикатор з позначенням одиниць вимірювання.

Час замкнутого стану ЕК називається часом рахунку ЛІ і визначається родом вимірюваної величини, а його конкретне значення - низкою міркувань, про які буде сказано нижче. Методи вимірювання частоти, які використовуються в сучасних приладах, ґрунтуються на класичному визначенні частоти як величини оберненої до періоду [2]. Структурна схема ЦЧ в цьому режимі роботи наведена на рис. 1.

Напряга частоти f_x , що вимірюється (рис. 1,б) подається на вхід формувального пристрою (ФП), призначення якого - формування сигналів стандартної форми при досить довільній формі вхідного сигналу. Зазвичай, до складу ФП входять підсилювач-обмежувач, що забезпечує задану амплітуду свого вихідного сигналу, і формувач для забезпечення малої тривалості фронту і зрізу імпульсів на виході ФП. Частота цих імпульсів дорівнює частоті вхідного сигналу (рис. 1,в). Ці імпульси подаються через ЕК на ЛІ протягом часу рахунку T_p , яке задається генератором опорної частоти (ГОЧ) і дільником частоти ДЧ. Частота ГОЧ стабілізована кварцовим резонатором. Необхідна величина T_p вибирається перемикачем ЧАС РАХУНКУ. При кожному запуску приладу на виході ДЧ з'являється один імпульс (рис. 1,в), під дією якого замикається ЕК [2, 3].

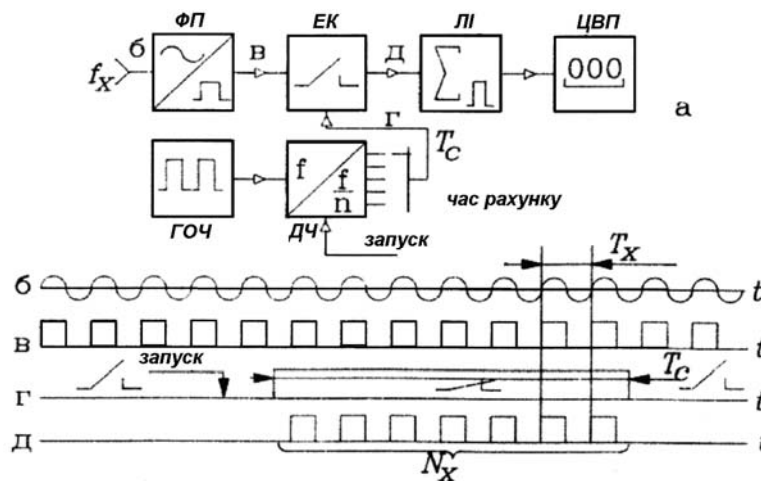


Рис. 1. Структурна схема цифрового частотоміра в режимі вимірювання частоти та часові діаграми в характерних точках

Число імпульсів N_x , що минув на ЛІ, визначається наближеною формулою:

$$N_x = \frac{T_p}{T_x} = T_p f_x, \quad (1)$$

а значення вимірюваної частоти -

$$f_x = \frac{N_x}{T_p}. \quad (2)$$

Вимірювання періоду цифровим частотоміром представлено на рис. 2

Структура ЦЧ в цьому режимі наведена на рис. 2,а. У цьому режимі час замкнутого стану ЕК задається періодом (або n періодами). Вхідний сигнал, період якого T_x вимірюється (рис. 2, б) так само, як і при вимірюванні частоти, подається на вхід ФП. Вихідний сигнал ФП (рис. 2, в) надходить на дільник частоти ДЧ (множник періодів T_x). Число n (зазвичай n - це 1, 10, 10^2 , 10^3 або 10^4) вибирається перемикачем ЧАС РАХУНКУ, тобто, nT_x . При запуску на виході ДЧ з'являється імпульс по тривалості рівний nT_x (рис. 2, г), протягом якого ЛІ підраховує пройдений за цей час імпульси з відомим періодом проходження $T_{\text{такт}}$

(рис. 2,д), які часто називаються «мітками часу» [2]. Число імпульсів N_x і період T_x , наближено визначаються формулами (3) і (4) [2, 5, 6]:

$$N_x = \frac{nT_x}{T_{\text{такт}}}, \tag{3}$$

$$T_x = \frac{N_x T_{\text{такт}}}{n}. \tag{4}$$

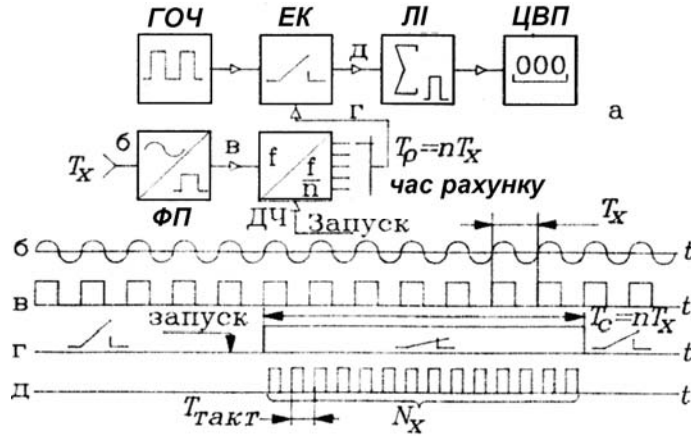


Рис. 2. Структурна схема ЦЧ в режимі вимірювання періоду та часові діаграми в характерних точках

Відомо, що частота f і період T пов'язані формулою [3]:

$$1 = f \cdot T. \tag{5}$$

Тому, через пряме вимірювання однієї з цих величин можна знайти результат непрямого вимірювання іншої.

Розглянемо більш детально похибки вимірювання частоти. У режимі вимірювання частоти протягом T_c підраховуються імпульси, які поступають із вимірюваною частотою f_x (рис. 3).

Для цього випадку маємо:

$$T_{\text{рах}} = N_x T_x - t_1 + t_2 \tag{6}$$

Якщо не докладати спеціальних заходів щодо синхронізації імпульсу $T_{\text{рах}}$ та імпульсів вимірюваної частоти (тобто, якщо не задається примусово певне положення цих імпульсів по відношенню один до одного), то інтервали t_1 і t_2 є незалежними величинами, значення кожної з яких лежить в інтервалі $\{0 - T_x\}$ і тому

$$-T_x \leq -t_1 + t_2 \leq +T_x. \tag{7}$$

Поділивши обидві частини рівняння (6) на добуток $T_c \cdot T_x$, отримуємо:

$$f_x = \frac{N_x}{T_c} \pm \frac{q}{T_c}, \tag{8}$$

з урахуванням того, що

$$f_x = \frac{1}{T_x} \text{ і } q = \frac{-t_1 + t_2}{T_x}, \quad 0 \leq q \leq 1.$$

У режимі вимірювання частоти величина $\frac{1}{T_c}$ є ціною одиниці молодшого розряду лічильника ($C_f = \frac{1}{T_c}$), що має розмірність Герц (с^{-1}). Залежно від вибраного значення T_c будемо мати [3–7]: $C_f = 1\text{Гц}$ ($T_c = 1\text{с}$); $C_f = 10\text{Гц}$ ($T_c = 0,1\text{с}$); $C_f = 0,1\text{Гц}$ ($T_c = 10\text{с}$) і т. д.

Тому формулу (8) можна представити у вигляді:

$$f_x = N_x C_f \pm q C_f. \quad (9)$$

Випадкову складову похибки називають $\Delta_1 = \pm q C_f$ похибкою рахунку (при більш строгому підході у цій похибці виділяють дві складові: похибку дискретності і похибку несинхронізації).

Відносне значення цієї похибки однакове [7]:

$$\delta_1 = \frac{\Delta_1}{f_x} 10^2 = \frac{q}{T_c} 10^2. \quad (10)$$

Причому

$$\delta_{1\max} \leq \frac{1}{T_c} 10^2. \quad (11)$$

Іншим джерелом похибок ЦЧ є відхилення T_c від номінального значення і його нестабільність. У ЦЧ T_c формується з цілого числа періодів коливань кварцового генератора, для якого характерна надзвичайно висока стабільність частоти генерованих ним коливань. Для зменшення впливу температури середовища в ЦЧ застосовується термостатування генератора.

Таким чином, друга складова похибки вимірювання частоти визначається нестабільністю частоти кварцового генератора [7]:

$$\delta = \frac{\Delta f_0}{f_0} 10^2 [\%]. \quad (12)$$

І тому $\delta_{T_c} = \delta_0$. Отже,

$$\Delta_2 = \frac{N_x}{T_c} \delta_0 10^{-2} = f_x \delta_0 10^{-2} \quad (13)$$

і

$$\delta_2 = \frac{\Delta_2}{f_x} 10^2 = \delta_0. \quad (14)$$

Сумарні похибки вимірювання частоти рівні [3, 7]:

$$\Delta_{f_x} = \Delta_1 + \Delta_2 = \pm \left(\frac{1}{T_c} + f_x \delta_0 10^2 \right) [\Gamma\text{ц}], \quad (15)$$

$$\delta_{f_x} = \pm \left(\frac{10^2}{f_x T_c} + \delta_0 \right) [\%]. \quad (16)$$

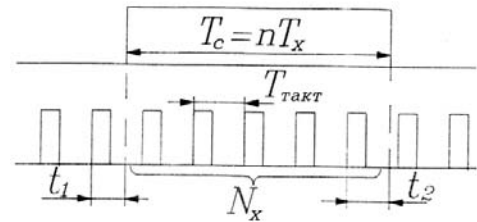


Рис. 4. Пояснення утворення похибки вимірювання періоду

Розглянемо більш детально похибки вимірювання періоду (рис. 4).

При вимірюванні періоду (рис. 4) протягом T_x (або nT_x) на СІ проходять імпульси з відомим періодом проходження $T_{\text{такт}}$ і тому (див. рис. 4,б)

$$T_x = N_x T_{\text{такт}} - t_1 + t_2. \quad (17)$$

Так само, як і в попередньому випадку, $-t_1 \div t_2$ - є випадковою величиною, причому:

$$-T_{\text{такт}} \leq -t_1 + t_2 \leq +T_{\text{такт}},$$

тобто:

$$\Delta_1 = q T_{\text{такт}} = q C_T. \quad (18)$$

При вимірюванні за n періодів маємо:

$$nT_x = N_x T_{\text{такт}} - t_1 + t_2 \quad (19)$$

або

$$T_x = N_x \frac{T_{\text{такт}}}{n} + q \frac{T_{\text{такт}}}{n} = N_x \frac{C_T}{n} \pm q_T \frac{C_T}{n}, \quad (20)$$

що еквівалентно зменшенню ціни одиниці молодшого розряду в n разів.

Період проходження імпульсів $T_{\text{такт}}$ задається тим же кварцовим генератором, і всі попередні зауваження щодо нестабільності T_c повністю справедливі і для цього режиму роботи [2, 7]. Тому:

$$\Delta_2 = N_x T_{\text{такт}} \delta_0 10^{-2} = T_x \delta_0 10^{-2}, \quad (21)$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta_2}{T_x} 10^2 = \delta_0. \quad (22)$$

Сумарні похибки (абсолютна і відносна) вимірювання періоду визначаються виразами:

$$\Delta_T = \Delta_1 + \Delta_2 = \pm (T_{\text{такт}} + T_x \delta_0 10^{-2}) [\text{C}], \quad (23)$$

$$\delta_T = \delta_1 + \delta_2 = \pm \left(\frac{T_{\text{такт}}}{nT_x} 10^2 + \delta_0 \right) \cdot [\%]. \quad (24)$$

Узагальнений вигляд залежностей методичних похибок співпадає із аналогічними характеристиками методів послідовної лічби (ЕРЧ), та методу оберненої лічби (*reciprocal*), що показано на рис. 5.

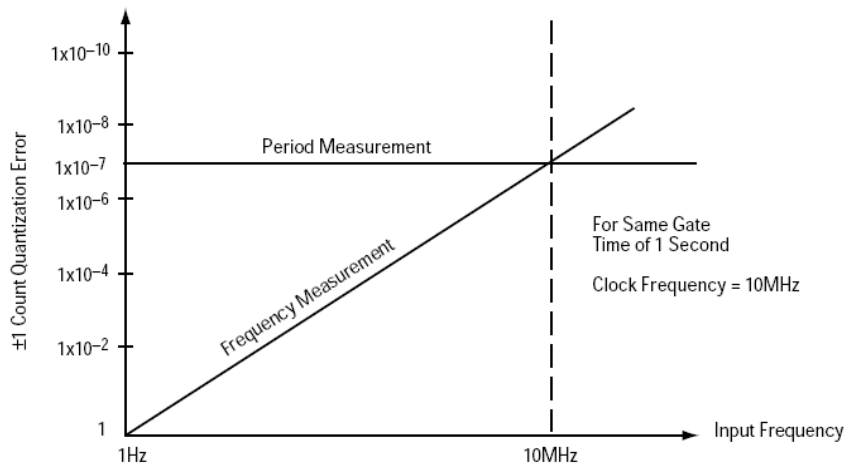


Рис. 5. Графік порівняння ефективності методів послідовної лічби та вимірювання через період

В обох випадках похибка дискретності залежить і від опорної частоти $f_{\text{clock}} = 10\text{МГц}$ та часу вимірювання $T_{\text{measur}} = 1\text{с}$, а при його зменшенні чи невизначенній тривалості похибки у відповідну кількість разів збільшуються, або вимірювання стають неможливими.

Тому для типового випадку сигналу із невизначеним часом доступу (існування) є радіоімпульсний сигнал, а єдиним придатним методом вимірювання є Фазочастотний підхід до поняття частоти і вимірювання за методом коінциденції [2, 7].

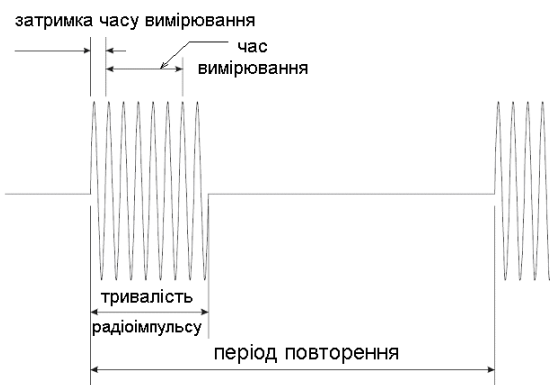


Рис. 6. Радіоімпульсний сигнал

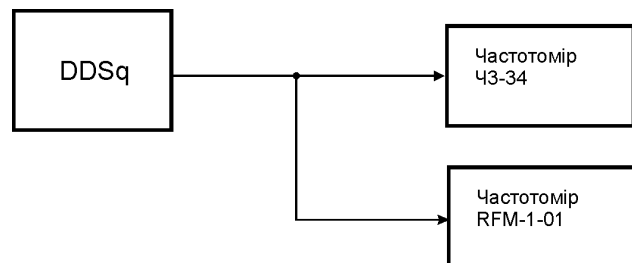


Рис. 7. Схема установки для порівняння швидкодії перебудови та точності вимірювання частотомірів ЧЗ-34 та RFM-1-01

Порівняння ефективності сучасних відомих та розробленого методу і частотоміра коінциденції за критерієм точність x швидкодія

Для знаходження конкретних цифрових значень покращення визначального для випадку вимірювання частоти в РТС і ТКС (сигналу типу радіоімпульс рис. 6) є сенс провести саме порівняння трипараметрової величини, яка пов'язує визначальні параметри для випадку вимірювання частоти цифровими методами. Лише за цих умов, якісні характеристики та переваги методу коінциденції отримані в [2, 7] набувають аналітичної доказової бази і можуть слугувати методичним матеріалом вже для проектування частотомірів коінциденції із наперед заданими параметрами точності та швидкодії вимірювання частоти в РТС і ТКС.

Такими параметрами виступають:

f_{on} – частота опорного генератора (опорна частота вимірювань);

f_x – частота сигналу який підлягає вимірюванню;

$T_c (T_{\text{вим}})$ – час вимірювання, він же час доступу до сигналу;

Δ_f – абсолютна похибка вимірювання частоти (роздільча здатність).

Так відомі методи [3, 5, 6, 9, 10, 11] прийнято оцінювати за узагальненою формулою:

$$f_o \geq 3 \frac{f_x}{\Delta_f T_c} \quad (24)$$

Дана форма запису є незручною для порівняння, тому перепишемо її у вигляді:

$$\delta_{f_x} = \frac{3}{f_{on} T_{вим}} \quad (25)$$

Для методу коінциденції можливо записати систему рівнянь які пов'язують вказані параметри і розглянуті в [12–14].

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{вим} = \frac{N_{on}}{f_{op}} \\ f_x = \frac{N_x}{N_{on}} f_{on} \\ \Delta f_x \cong \frac{f_x}{2^{2n_{on}-2}} \\ \delta_{f_x} \cong \frac{1}{2^{2n_{on}-2}} \end{array} \right. \quad (26)$$

Якщо перші два рівняння відомі і є наслідком методу коінциденції, то третя і четверта формули (досить наближена оцінка) є аналітичним відображенням збільшення густини поділок на шкалі відношень за умови розрядності цифрових значень в двійковій системі n_{on} , а N_{on}, N_x відповідно цифрові значення чисельника та знаменника дробово-раціональної шкали вимірювань.

Із системи рівнянь (26) досить легко можливо знайти всі параметри частотоміра, і необхідний нам для порівняння комплексний параметр, який пов'яже визначальні величини, який можна записати як:

$$\delta_{f_x} \cong \frac{4}{T_{вим}^2 f_{on}^2} = \left(\frac{2}{T_{вим} f_{on}} \right)^2 \quad (27)$$

Звідки вираш методу коінциденції над іншими відомими цифровими методами можливо оцінити як:

$$B = \frac{\delta_{fk_{класс}}}{\delta_{fk_{коинц}}} = \frac{3}{\left(\frac{2}{T_{вим} f_{on}} \right)^2} = \frac{3}{4} \cdot f_{on} T_c = \frac{3}{4} \cdot N_{on} = 3 \cdot 2^{n_{on}-2} \quad (28)$$

Вказаний аналітичний вираз оцінки вирашу у комплексному параметрі (точність вимірювання x швидкість вимірювання) показує таку ж функціональну залежність, яку ми спостерігали досліджуючи кількість поділок на шкалі вимірювання частотоміра коінциденції в залежності від розрядності (значень) представлення результатів у лічильниках чисельника та знаменника [12–14].

Порівняльні характеристики точності та швидкодії вимірювання частоти найкращим із сучасних частотомірів CNT-90 і Fetronics RFM-01-1 та його фото наведено на рис. 8, та рис. 9.

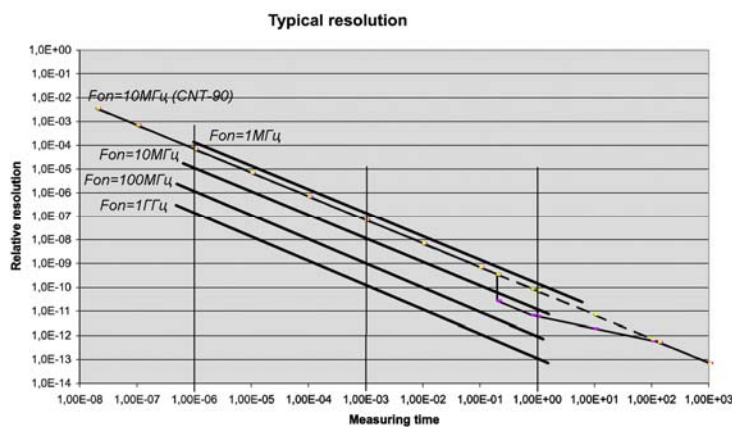


Рис. 8. Порівняння характеристик частотомірів коінциденції із «найкращим у світі» частотоміром CNT-90



Рис. 9. Частотомір FETRONICS RFM-01

Вимірювання частоти радіоімпульсних сигналів за допомогою частотоміра коінциденції

Вимірювання частоти як звичайних (необмежених у часі), так і радіосигналів за схемами підключення не має принципової різниці, але при невиконанні умови, коли час вимірювання є більшим або рівним часу

існування (доступу) до сигналу вірне вимірювання відбуватися не може.

Для практичних досліджень теоретичних висновків та результатів моделювання були проведено практичні дослідження двох зразків вимірювачів частоти за методом коінциденції (рис. 9), які являють собою частотомір FETRONICS RFM-01 (завершений прилад із індикатором), а також швидкодіючий вимірювальний перетворювач у вигляді блока з USB виходом, для підключення до комп'ютера.

Висновки

Встановлено, що в рамках фазочастотного підходу до вимірювання частоти за методом коінциденції (співпадіння) можливо утворити вимірювальну шкалу з розрізняльною здатністю на декілька порядків вищою ніж у існуючих цифрових методів при одночасному зменшенні часу вимірювання [12, 13]. Тільки використання фазочастотного підходу до визначення частоти, і застосування фазочастотних вимірювань, де первинною є повна фаза сигналу, а частота визначається як похідна, принципово вирішує зазначені вище проблеми, підвищуючи одночасно і точність і швидкодію вимірювання частоти. Використання в цифрових вимірювачах фазочастотної моделі вимірювань усуває методичну похибку, залежність від часу вимірювання, і теоретично обмежена інструментальною та розрядною сіткою цифрового представлення результатів вимірювання.

Література

1. Гутников В. С. Фильтрация измерительных сигналов / Гутников В. С. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинград. Отд–ние, 1990. – 192 с.
2. Измерения в электронике : справочник / В. А. Кузнецов / [и др.] ; под ред. В. А. Кузнецова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
3. Швецкий Б. Н. Электронные цифровые приборы / Швецкий Б. Н. : [2-е изд. , перераб. и доп.] – К. : Техника, 1991. – 191 с.
4. Троцишин И. В. Новые возможности обработки и измерения параметров радиосигналов на основе фазочастотных методов / И. В. Троцишин // СВЧ-техника и спутниковый прием : материалы 3–й Крымской конф. – Севастополь, 1993. – С. 189–192.
5. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник : у 2т. / [М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик]; За ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005. – Т. 1. Основи метрології. – 532 с.
6. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник : у 2т. / [М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик]; За ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005. – Т. 2. Вимірювальна техніка. – 656 с.
7. Троцишина Л. В. Особливості частоти як вимірювальної величини та класифікація методів її вимірювання / Троцишина Л. В., Войтюк О. П., Любчик В. Р., Троцишин І. В. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2007. – № 2. – С. 191–202.
8. А. с. 1191839 СССР, МКИ G 01 R 23/02. Устройство для сравнения частот / В. Е. Брагин, А. В. Макаров (СССР). – опубл. 15. 11. 85, бюл. № 42. – 5 с.
9. A High Frequency Reference Module / Valpey Fisher Corporation // Microwave Journal. – 2005, April.
10. CNT–91 & CNT–90 50ps&100ps Timer/Counter/Analyzers [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.pendulum-instruments.com/pdf/.../12-pd_cnt-90_rev15_200906.pdf.
11. Fundamentals of the Electronic Counters . Application Note 200. Electronic Counter Series. Hewlett-Packard Co. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http:// www. Agilent. com. Agilent Technologies, Understanding Frequency Counter Specifications.](http://www.Agilent.com)
12. Троцишин І. В. Дослідження статичних та динамічних характеристик дробоворазомної шкали вимірювань за методом коінциденції / І. В. Троцишин, О. П. Войтюк, Л. В. Троцишина // Матеріали IV-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП – 2009)”. – Вінниця, 2009. – С. 86.
13. Троцишин І. В. Вимірювання частоти за методом коінциденції та особливості утворення шкали вимірювального перетворення / І. В. Троцишин, О. П. Войтюк, Л. В. Троцишина // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 3. –Технічні науки. – С. 240–244.
14. Троцишин И. В. Исследование метрологических характеристик шкалы измерителя частоты по методу коинциденции / И. В. Троцишин, О. П. Войтюк, Л. В. Троцишина // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы 18-ой международной Крымской конференции, Севастополь, 8–12 сентября 2008 г. –Т2. – С. 685–687.

Надійшла 9.9.2010 р.