

## ПРОБЛЕМИ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ СИГНАЛІВ ОПОРНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ ПОДОЛАННЯ

Приведено унікальні можливості застосування методу шкали коінцидентції (подвійного спів падіння) для вирішення принципового питання одночасного підвищення і точності і швидкодії вимірювального перетворення як фазочастотних так і амплітудних параметрів радіосигналів. Представлено обґрунтування принципів та методологій застосування на прикладі вимірювання і формування радіосигналів із унікальним набором параметрів, які не можуть бути досягнуті в рамках сучасних (класичних) методів вимірювань.

Ключові слова: квантова теорія вимірювального перетворення, шкала відношень, метод коінцидентції, атенюатор-подільник Троцишина.

I.V. TROTSYSHYN, H.Yu. SHOKOTKO

Odessa National Academy of Telecommunications. O.S.Popov

O.P VOITYUK

Khmelnytsky National University

## PROBLEMS OF MODERN APPROACHES TO THE MEASUREMENT SIGNAL FREQUENCY REFERENCE GENERATOR AND POSSIBLE SOLUTIONS

Powered unique features of the method coincident scale (dual match) to address fundamental issues simultaneously increasing speed and accuracy of measuring and converting a phase-frequency and amplitude parameters of radio signals. Presented study of principles and methodologies for use in case of measuring radio and the formation of a unique set of parameters that can not be achieved under current (classical) measurement methods.

Keywords: quantum theory of measurement conversion scale ratios, the method coincidence, attenuator-divider Trotsyshyn.

### Вступ

Основним завданням вимірювань та вимірювальних приладів є отримання інформації про результат вимірювання із максимально можливою точністю (мінімальними похибками) за мінімальний час вимірювання (швидкодія), але існуючі принципи та методи вимірювань, згідно ДСТУ (ГОСТ) та МІ, мають принципові обмеження, які спираються на квантово-механічний принцип невизначеності Гейзенберга. Так, для математичної моделі визначення частоти, як величини оберненої до періоду, для методу послідовної лічби (електронно-лічильний частотомір) для отримання розрізнення в 1гц, час вимірювання повинний бути більшим 1с ( $1 \leq \Delta T \cdot \Delta F$ ). Всі інші сучасні методи вимірювання частоти, використовують підхід до вимірювання періоду та обчислення частоти, за відомою формулою  $F_x = \frac{1}{T_x}$ , отримують аналогічні

обмеження, які залежать від співвідношення частоти квантування та значення частоти вимірюваної  $f_{KB}/F_x$ , тобто, модель має принципове обмеження і не допускає одночасного підвищення і точності і швидкодії.

В той час, в рамках теорії фазочастотних вимірювань і перетворень ради сигналів було доведено що первинним для них є повний фазовий зсув, а частота є величиною похідною, і як наслідок встановлено, що вимірювальна шкала повинна містити не лише цілочисельну а і дробову частини, причому її поділки повинні розташовуватися у проміжках «класичної цілочисельної шкали частот» [1-10].

Метою даної статті є прослідкувати методологічно шлях становлення нового напрямку в теорії вимірювань, а саме квантової теорії вимірювального перетворення (КТВП), котра дозволила не порушуючи невизначеності Гейзенберга, зняти штучні обмеження, які виникли в наслідок неадекватності моделей, а також вказати шляхи вирішення вказаних проблем..

### Основні хронологічні та методологічні аспекти розвитку цифрової частотометрії

За основу визначення особливостей становлення та сучасного стану цифрової частотометрії візьмемо запропоновану фірмою Pendulum Instruments класифікацію рис.1, яка відображає покоління (Generation) цифрових частотомірів та принцип на якому вони побудовані, як порівняння використано кількість десяткових знаків за час вимірювання 1 с [2].

Необхідно відзначити, що вказана ієрархічна структура вже змінилась, і зараз є нові принципи які дозволяють принципово покращити вказані параметри[1,3]. Але для з'ясування всіх особливостей відомих методів, проведемо їх аналіз, та вкажемо на принципові недоліки.

Так, очевидним є той факт, що розмови про результативність вимірювання із 5 і більше десяткових знаків мають сенс лише за наявності відповідних борних джерел частоти, і на сьогодні шкала відносної нестабільності різних опорних генераторів має вигляд рис.2.

Tracing the evolution of time stamping over multiple generations of instruments			
EVOLUTION	TIME FRAME	TYPE	RESOLUTION FOR MEASURING TIME OF 1 s
Generation 1	1970	Conventional counters	2 to 8 digits
Generation 2	1980	Reciprocal counters	7 to 9 digits
Generation 3	1990	Interpolating reciprocal counters	9 to 11 digits
Generation 4	2000	Continuously time stamping counters with regression analysis*	12 digits

\*Continuous time stamping was applied for the first time in modulation domain analyzers from Hewlett-Packard Co. (Santa Clara, CA, now Agilent Technologies) at the end of the 1980s, albeit without improvement in resolution.

Рис.1. Еволюція розвитку цифрових частотомірів

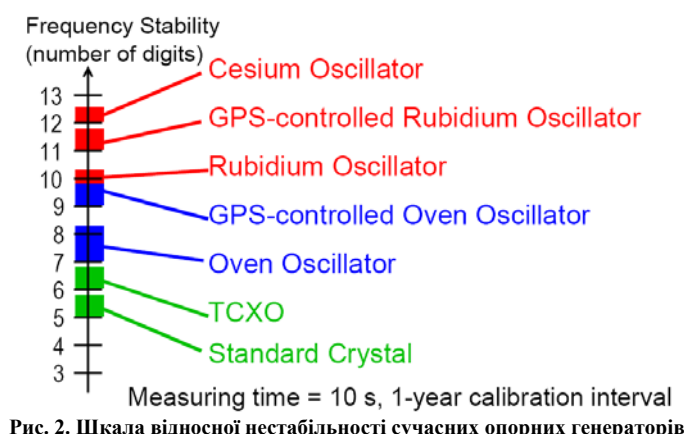


Рис. 2. Шкала відносної нестабільності сучасних опорних генераторів

Тому питання точності вимірювання частоти у 10-12 десяткових знаків цілком правомірне, якщо використовуються Рубідієві або Цезієві стандарти частоти, чи навіть сигнали Водневого еталона. Тому розглянемо історично перший так званий метод послідовної лічби (електронно-лічильного частотоміра).

Принцип роботи і структурна схема реалізації маю всім відомий вигляд (рис.3 – рис.4), і результати точності вимірювання напряду залежать від часу вимірювання, котрий до частоти реального сигналу ніякого відношення не має, але є визначальним, на що вказує рис.5.

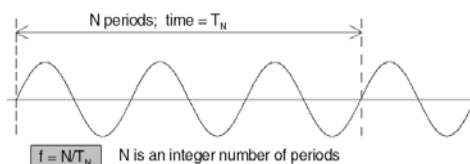


Рис. 3. Принцип послідовної лічби

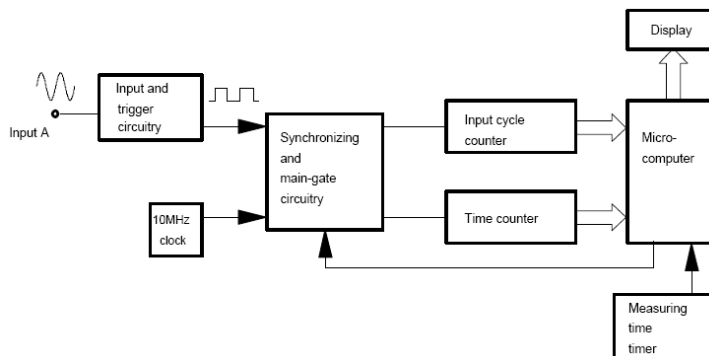


Рис. 4. Частотомір послідовної лічби

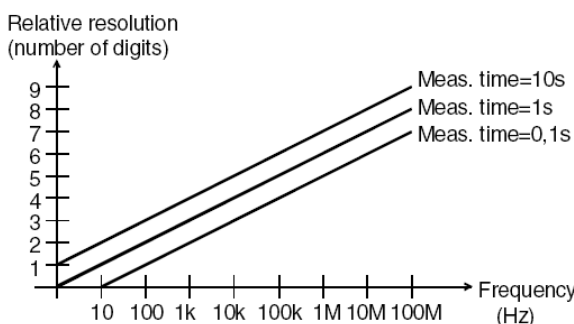


Рис. 5. Залежність роздільної здатності від частоти і часу вимірювання

Таким чином, очевидним є суттєва обмеженість донного методу для вимірювання частоти, але він був основним у 70-80 роках минулого сторіччя, і промисловістю було випущено мільйони електронно-лічильних частотомірів [2].

В той же час існує інший підхід, визначення частоти через період сигналу, вітчизняні автори

називають його обчислювальний, за кордоном він відомий як Reciprocal (зворотної лічби) [2-4]. Принцип дії його також досить відомий і відображається структурною схемою рис.6, та характерною саме йому залежністю роздільної здатності від частоти та часу вимірювання рис. 7. Необхідно відзначити, що серійні частотоміри як правило містять ще інтерполятор дробової частини періоду, що і відображено на рис.6.

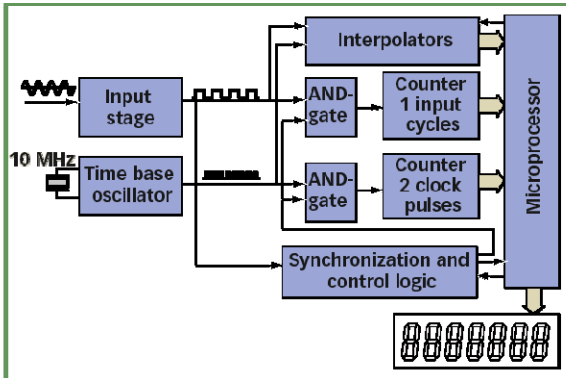


Рис. 6. Структурна схема класичного обчислювального частотоміра

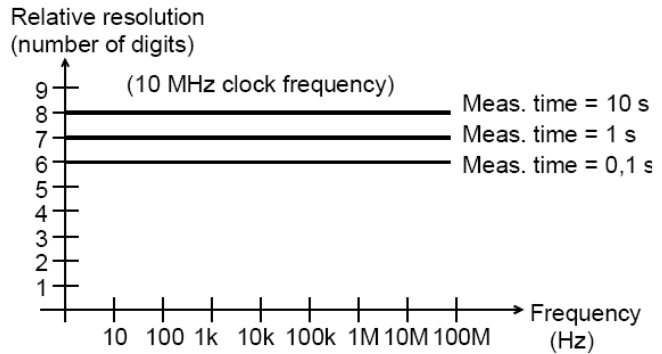
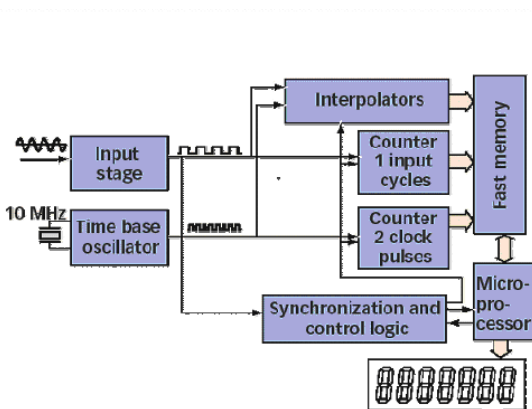


Рис.7. Розрізняльна здатність обчислювального частотоміра

Потреба в інтерполяції виникає на низьких частотах, і при малих значеннях часу вимірювання (рис.7), що заставило розробників довести ефективність інтерполяції до 1000, а також запропонувати новий підхід який отримав назву (Time-stamping) і в 2004 році був запропонований фірмою Pendulum Instrument і вперше був реалізований у серійному частотомірі-аналізаторі CNT-90 [5-7].

Структурна схема рис.8. і зовнішній вигляд рис.9 частотоміра-аналізатора залишились майже тими що і у попередника, змін зазнала процедура вибірок та обробки сигналу, при досить простій повній структурній схемі рис.10.



This block diagram represents a time-stamping counter, such as the CNT-90.

Рис.8. Структурна схема частотоміра CNT-90



The CNT-90 timer/counter/analyzer provides 12 digits/s of frequency-measurement resolution to 20 GHz

Рис. 9. Зовнішній вигляд частотоміра CNT-90

Порівняльні характеристики всіх чотирьох характерних методів вимірювання частоти приведено на рис.11. На рис.12 наведено детально залежність роздільної здатності від часу вимірювання та відносної похибки CNT-90.

Детально проаналізувавши досягнення сучасної частотометрії, та врахувавши висунутий розробниками CNT-90 "Если CNT-90 не может выполнить измерение, то этого не сможет ни один другой счетчик", складається враження що питання всі вирішено.

Але це не так, тому при вимірюванні у сучасних радіотехнічних та телекомунікаційних системах типовим є сигнал що являє собою радіоімпульс, із невідомою тривалістю, але часом існування в одиниці – десятки нано-мікросекунд, при цьому питання точності вимірювання частоти в діапазонах стень МГц - десятків ГГц повинем складати од-сотні Гц.

Так в таблиці 1 та на рис.13. наведено діапазон параметрів радіосигналів у сучасних радіо та телекомунікаційних системах та типову форму сигналу.

При вказаних вище вимогах, які узагальнено можливо звести до визначення частоти сигналу за сотні –тисячі періодів коливання в діапазоні високих та надвисоких частот, навіть CNT-90 не може виконати вимірювання із регламентованою роздільною здатністю, але існують і метод і прилади які це здатні зробити, вони працюють на основі методу коінциденції, а чому лише вони на це здатні пояснює теорія ФЧВ і ПР [2 -8 ], а також підтверджується теорією надлишкових вимірювань [2-8]. Досить наглядно принцип коінциденції показує процес його моделювання для прямокутних імпульсів на рис.14, і його алгоритм рис.15.

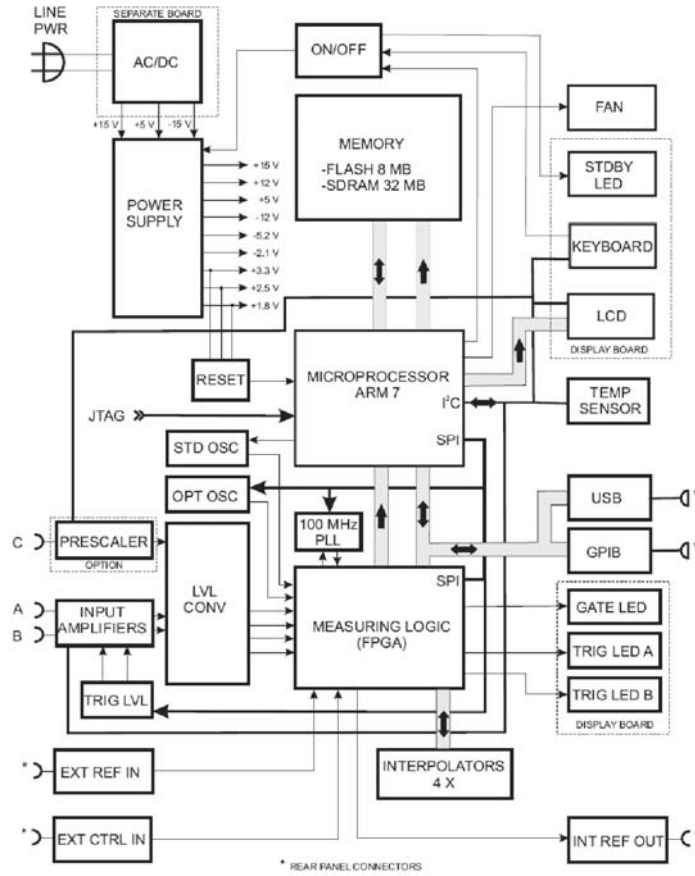


Рис.10 Повна структурна схема CNT-90

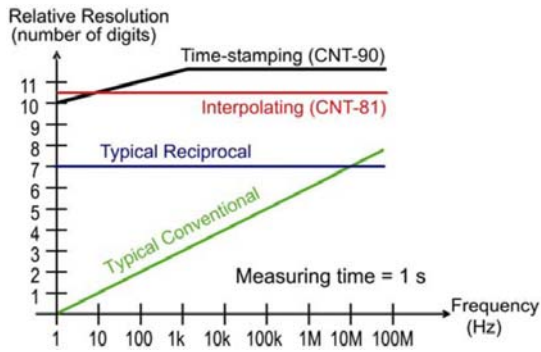


Рис. 11. Порівняльні характеристики існуючих методів вимірювання

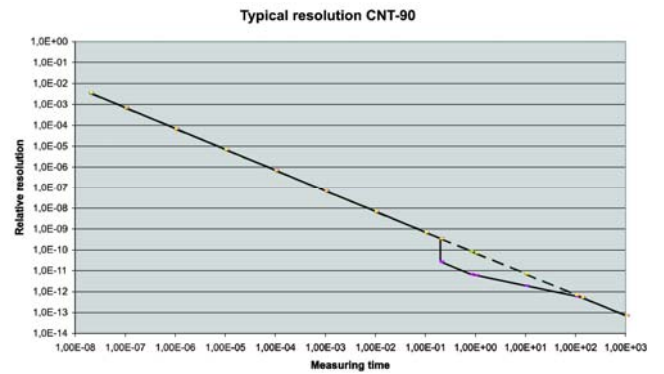


Рис. 12. Залежність роздільної здатності від часу вимірювання та відносної похибки CNT-90

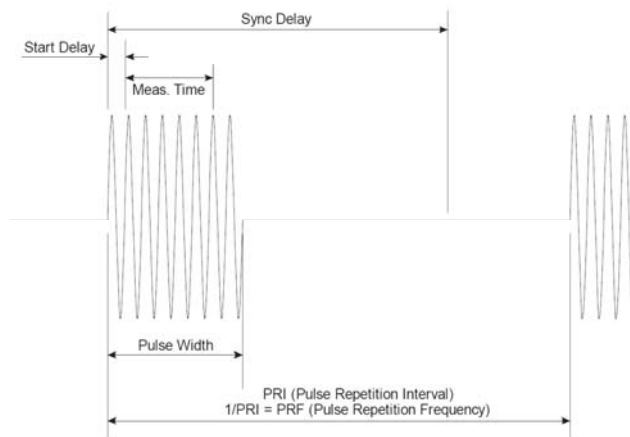


Рис.13. Типовий сигнал типу «радіоімпульс» з апріорі невідомою тривалістю

Application or Device	Required Uncertainty	
	Time	Frequency
AM Radio Carrier frequency	NA	$1.2 \times 10^{-5}$
FM Radio Carrier frequency	NA	$1.9 \times 10^{-5}$
TV Carrier Frequency	NA	$1.2 \times 10^{-6}$
Shortwave Carrier Frequency	NA	$1.5 \times 10^{-5}$
Color TV subcarrier	NA	$3 \times 10^{-6}$
Electric Power Generation	10 ms	NA
Electric Power Event Recorders	1 ms	NA
Electric Power Stability Controls	46 $\mu$ s	NA
Electric Power Network Controls	4.6 $\mu$ s	NA
Electric Power Fault Locators	1 $\mu$ s	NA
Electric Power Synchrophasors	1 $\mu$ s	NA
Telecommunications, Stratum-1 clock	NA	$1 \times 10^{-11}$
Telecommunications, Stratum-2 clock	NA	$1.6 \times 10^{-8}$
Telecommunications, Stratum-3E clock	NA	$1 \times 10^{-6}$
Telecommunications, Stratum-3 clock	NA	$4.6 \times 10^{-6}$
Mobile Telephones, CDMA	10 $\mu$ s	$5 \times 10^{-8}$
Mobile Telephones, GSM	NA	$5 \times 10^{-8}$
Wireless Networks, 802.11g	NA	$2.5 \times 10^{-5}$
Frequency Calibration Laboratories	NA	$1 \times 10^{-12}$
Josephson Array Voltage Standard	NA	$1 \times 10^{-11}$
GPS Space Clocks	NA	$6 \times 10^{-14}$
State-of-the-art time transfer	< 1 ns	parts in $10^{16}$

### Вимірювання частоти за методом коінциденції.

В результаті огляду та аналізу цифрових методів вимірювання частоти встановлено їх значний прогрес у покращення метрологічних характеристик таких як точність вимірювання та розширення частотного діапазону та функціональних можливостей. Встановлено що саме вони є основними вимірювачами частоти в РТС і ТКС, і визначають їх ефективність. Встановлено, що не дивлячись на унікальні паспортні дані сучасних частотомірів, навіть з подвійною ноніусною інтерполяцією (interpolating reciprocal counters), або використанням методу часових вибірок (time stamping counters), класичні підходи в принципі не здатні одночасно покращувати критичний для РТС і ТКС параметр *точність вимірювання x швидкість вимірювання*. Важливість вимірювань для розвитку суспільства має визначальну роль, а особливо це стосується наукових досліджень, про що ще сказав Д.І.Менделєєв”, “Наука починається лише тоді, коли починають вимірювати”. Цей відомий всім вислів є фундаментальним, але досить узагальненим, тому на практиці в галузі метрології та вимірювальної техніки виникають проблеми які пов’язані із досить примітивними підходами до процесу вимірювання, і як правило до спрощеного їх розгляду. Таких прикладів доволі багато, але ми розглянемо до яких наслідків це може призвести на прикладі вимірювання частоти та її параметрів, які займають маже половину вимірювань в радіотехнічних і особливо телекомунікаційних системах.

В роботах [1-8] питання вимірювання частоти за методом коінциденції знайшли своє відображення, але частина питань залишилась недослідженою. Тому питанню утворення шкали вимірювального перетворення є вихідним до правильного розуміння всієї процедури вимірювань та використання їх результатів.

**Метою цього розділу статті** є спроба показати деякі нові особливості утворення та поведінки вимірювальної шкали для методу коінциденції, з позицій вимірювання частоти із апіорі невідомим часом існування сигналу, тобто реальних швидкоплинних сигналів та процесів.

Класичні схеми вимірювання відомі [1,5,8] і представлені на рис 14 та рис. 15.

Всі схеми досить подібні, але лише за схемою [8] отриманої на основі фазочастотного підходу в раках Фазочастотної теорії вимірювання та перетворення радіосигналів [8,10], було побудовано та випробувано ряд частотомірів та вимірювальних перетворювачів, які дали унікальні результати, [8,10-11], але деталі процесу процедури вимірювання залишались поза увагою і не публікувались. Тому наведені нижче результати не лише вперше детально покажуть утворення вимірювальної шкали (так званої шкали відношень) не лише для процедури вимірювання частоти, а інших параметрів.

Характерним є порівняння розроблених та існуючих принципів вимірювання за комплексним параметром *точність x швидкість вимірювання*. (рис.16)

Очевидним є факт, що питання підвищення точності вимірювання зводиться до відносної роздільної здатності (number of digits), і час вимірювання, як правило, лежить в діапазоні одиниць секунд, в той же час типові тривалості радіосигналів в РТС і ТКС складає на 3-5 порядків менші величини, і відповідне зменшення точності вимірювань, а то і взагалі їх неможливості.

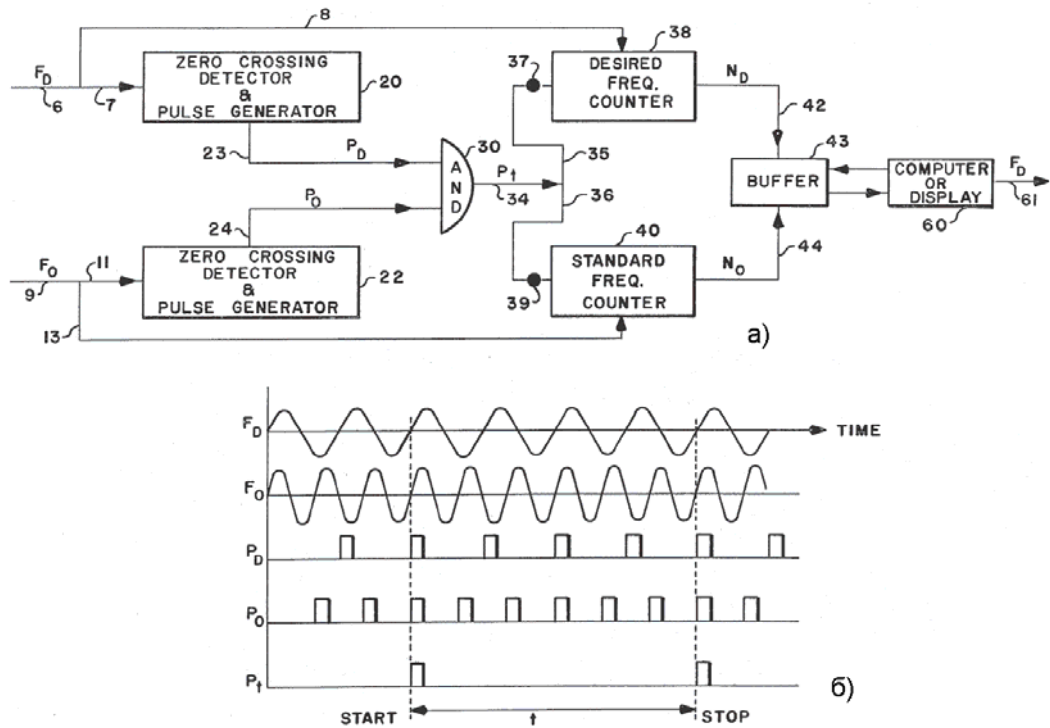


Рис.14. Запатентована схема вимірювання за методом коінциденції [1]

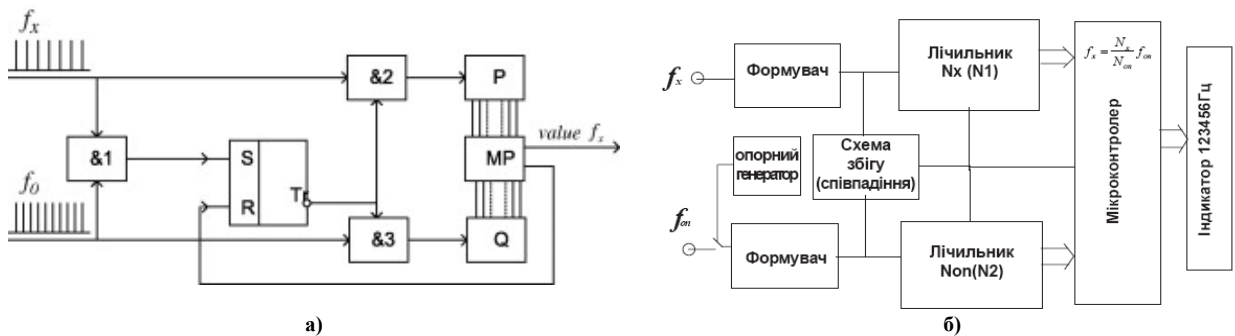


Рис. 15. Новітні схеми вимірювання частоти за методом коінциденції а[5] б[8]

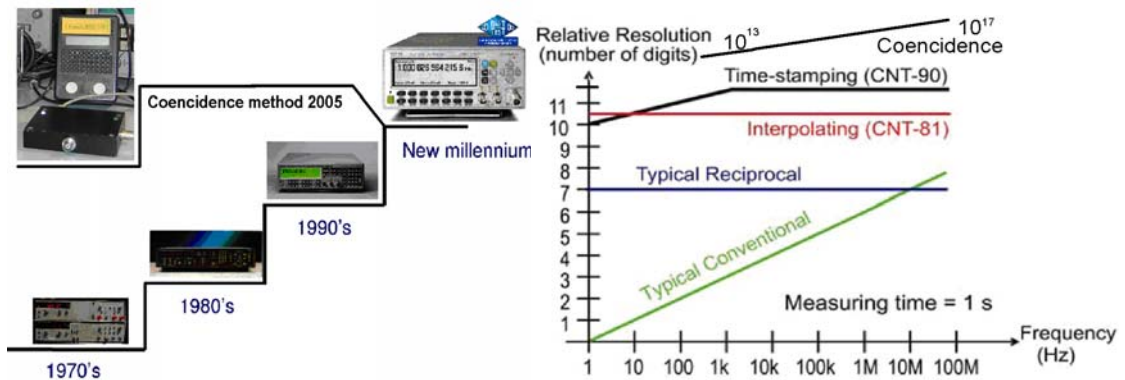


Рис. 16. Порівняння методів вимірювання частоти

Від вказаних обмежень вільний частотомір, який реалізує метод коінциденції, і може суттєво, 10-100 разів покращити параметр *точністьшвидкість* вимірювань, крім того за своїми методичними та структурними особливостями, він є найвищим рівнем в системі ієрархії цифрових частотомірів рис.16.

**Принципи і методологія квантової теорії вимірювального перетворення**

Першим питанням є вибір моделей які адекватні реальним сигналам, таким є питання відмови від прийнятої (класичної) моделі визначення частоти як величини  $1/T$ , (оберненої періоду). Адже очевидними є два моменти, Радіосигнали (які переносять інформацію) принципово не є періодичними, хіба що на обмежених ділянках, визначення миттєвої частоти як похідної від повної фази, (диференціювання). У всіх сучасних частотомірах операція вимірювання частоти полягає у функції підрахунку імпульсів (періодів) вимірюваного сигналу (інтегрування), що і призводить до обмеження: неможливості одночасного

покращення і точності і швидкодії вимірювань.



Рис. 17. Вимірювання частоти за методом коінциденції (1 Гц за час 1 мілісекунда)

Частотомір коінциденції (збігу, співпадіння) є прямим наслідком теорії ФЧВ і ПР, адже саме в рамках її визначень частота розглядається як похідна від повного фазового зсуву (ПФЗ), і друге твердження це те, що вимірювальна шкала такого вимірювача повинна мати не лише цілочисельні а й дробові значення вимірюваної величини. Саме тут є очевидним використання природних реперних точок, а також підтвердження, що саме метод коінциденції є найвищим рівнем в ієрархії цифрових методів вимірювання частоти і є очевидним і зрозумілим із рис.18. та рис.19.

Математична модель вимірювання частоти за методом коінциденції  $f_x = \frac{N_x}{N_{on}} f_{on}$ , має такий же

вигляд, як і для розглянутих вище, з тією різницею що значення  $N_x, N_{on}$  визначається шляхом коінциденції.

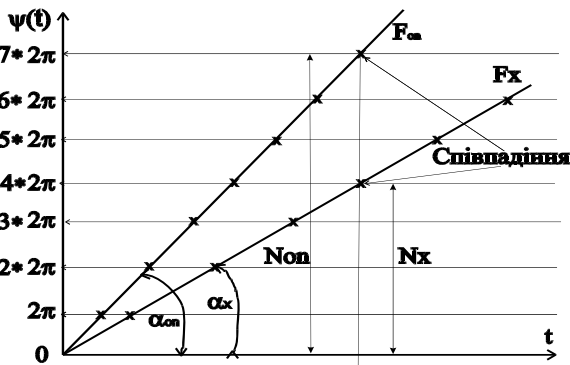


Рис. 18. Фазові портрети методу коінциденції ПФЗ в рамках теорії ФЧВ і ПР



Рис.19. Структурна схема частотоміра реперних точок

Вартість	Правка	Вартість	Правка	Вартість	Правка	Вартість	Правка	Вартість	Правка	Вартість	Правка
1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
1.000978	1.001957	1.003922	1.007874	1.015873	1.032258	1.066667	1.142857	1.230769	1.333333	1.454545	1.600000
1.001957	1.003922	1.007874	1.015873	1.032258	1.066667	1.142857	1.230769	1.333333	1.454545	1.600000	1.777778
1.002938	1.005894	1.011818	1.024000	1.040650	1.084746	1.185185	1.285714	1.400000	1.523810	1.666667	1.818182
1.003922	1.007874	1.015873	1.032258	1.040650	1.084746	1.185185	1.285714	1.400000	1.523810	1.666667	1.818182
1.004907	1.009820	1.019920	1.040000	1.049180	1.103448	1.230769	1.333333	1.454545	1.600000	1.777778	1.999999
1.005894	1.011818	1.024000	1.040650	1.049180	1.103448	1.230769	1.333333	1.454545	1.600000	1.777778	1.999999
1.006883	1.013811	1.028112	1.057851	1.057851	1.122807	1.280000	1.382353	1.500000	1.633333	1.777778	1.999999
1.007874	1.015873	1.032258	1.066667	1.066667	1.142857	1.280000	1.382353	1.500000	1.633333	1.777778	1.999999
1.008867	1.017893	1.036437	1.075630	1.075630	1.163636	1.391304	1.481539	1.600000	1.714286	1.818182	1.999999
1.009862	1.021956	1.044898	1.084746	1.084746	1.185185	1.481539	1.581353	1.700000	1.818182	1.999999	2.000000
1.010859	1.023922	1.048980	1.094017	1.094017	1.207547	1.581353	1.681353	1.800000	1.918182	2.000000	2.000000
1.011818	1.024000	1.049180	1.103448	1.103448	1.230769	1.681353	1.781353	1.900000	2.018182	2.000000	2.000000
1.012819	1.025938	1.053498	1.113043	1.113043	1.254902	1.781353	1.881353	2.000000	2.118182	2.000000	2.000000
1.013811	1.028112	1.057851	1.122807	1.122807	1.280000	1.881353	1.981353	2.100000	2.218182	2.000000	2.000000
1.014866	1.030181	1.062241	1.132743	1.132743	1.306122	1.981353	2.081353	2.200000	2.318182	2.000000	2.000000
1.015873	1.032258	1.066667	1.142857	1.142857	1.333333	2.081353	2.181353	2.300000	2.418182	2.000000	2.000000
1.016882	1.034343	1.071130	1.153153	1.153153	1.361702	2.181353	2.281353	2.400000	2.518182	2.000000	2.000000
1.017893	1.036437	1.075630	1.163636	1.163636	1.391304	2.281353	2.381353	2.500000	2.618182	2.000000	2.000000
1.018906	1.038540	1.080169	1.174312	1.174312	1.422222	2.381353	2.481353	2.600000	2.718182	2.000000	2.000000
1.019920	1.040650	1.084746	1.185185	1.185185	1.454545	2.481353	2.581353	2.700000	2.818182	2.000000	2.000000
1.020937	1.042770	1.089362	1.196252	1.196252	1.488372	2.581353	2.681353	2.800000	2.918182	2.000000	2.000000
1.021956	1.044898	1.094017	1.207547	1.207547	1.523810	2.681353	2.781353	2.900000	3.018182	2.000000	2.000000
1.022977	1.047035	1.098712	1.219048	1.219048	1.560976	2.781353	2.881353	3.000000	3.118182	2.000000	2.000000
1.024000	1.049180	1.103448	1.230769	1.230769	1.600000	2.881353	2.981353	3.100000	3.218182	2.000000	2.000000
1.025023	1.051335	1.108225	1.242718	1.242718	1.640206	2.981353	3.081353	3.200000	3.318182	2.000000	2.000000
1.026052	1.053498	1.113043	1.254902	1.254902	1.681211	3.081353	3.181353	3.300000	3.418182	2.000000	2.000000
1.027081	1.055670	1.117904	1.267237	1.267237	1.723970	3.181353	3.281353	3.400000	3.518182	2.000000	2.000000
1.028112	1.057851	1.122807	1.280000	1.280000	1.768319	3.281353	3.381353	3.500000	3.618182	2.000000	2.000000
1.029146	1.060041	1.127753	1.292929	1.292929	1.813251	3.381353	3.481353	3.600000	3.718182	2.000000	2.000000
1.030181	1.062241	1.132743	1.306321	1.306321	1.858733	3.481353	3.581353	3.700000	3.818182	2.000000	2.000000
1.031219	1.064449	1.137778	1.319588	1.319588	1.905714	3.581353	3.681353	3.800000	3.918182	2.000000	2.000000
1.032258	1.066667	1.142857	1.333333	1.333333	1.954146	3.681353	3.781353	3.900000	4.018182	2.000000	2.000000
1.033300	1.068894	1.147982	1.347368	1.347368	2.000000	3.781353	3.881353	4.000000	4.118182	2.000000	2.000000
1.034343	1.071130	1.153153	1.361702	1.361702	2.045116	3.881353	3.981353	4.100000	4.218182	2.000000	2.000000

Рис.20. Цифрові значення шкали частотоміра коінциденції (початок шкали для  $N_x, N_{on} [2^3 \div 2^9]$ )

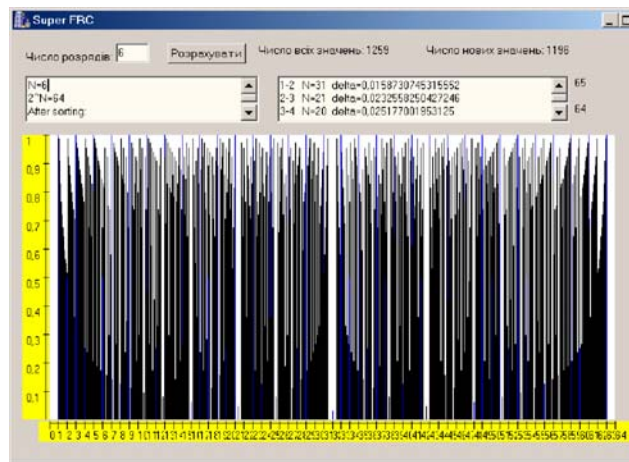


Рис.21. Вигляд шкали частотоміра коінциденції для  $N_x, N_{on} = 2^6$

Дослідженням числових значень шкали вимірювання за методом коінциденції було отримано ряд

нових результатів які підтвердили передбачення теорії ФЧВ і ПР про дробово-раціональну шкалу вимірювань, а також можливість покращення основних метрологічних характеристик, таких як роздільну здатність (точність) вимірювань, і час вимірювання (швидкодія). На рис. 20, та рис.21 відповідно приведено цифрові значення шкали від кількості розрядів лічильників, і графічний вигляд поділок на шкалі для випадку  $N_x, N_{on} = 2^6$ , де довжина штрихів пропорційна часу вимірювання.

Для встановлення ефективності збільшення роздільної здатності частотомера коінциденції було проведено його порівняння із шкалою класичного частотомера, результати яких зведено до табл.2 та відображено на рис. 22.

Таблиця 2

N	Кількість поділок класична шкала	Кількість поділок повна шкала частотомера коінциденції (All)	Кількість поділок доповненя до шкали частотомера коінциденції (New)	Максимальна роздільна здатність в межах кроку $1/2N$ (min delta)
2	4	5	2	0.333333
3	8	21	14	0.142857
4	16	79	64	0.066667
5	32	323	292	0.032258
6	64	1259	1196	0.015873
7	128	5021	4894	0.007874
8	256	19947	19692	0.003922
9	512	79851	79340	0.001957
10	1024	318863	317940	0.000978
16	65356	$10^{12}$ (прогноз)	$10^{12}$ (прогноз)	$10^{-6}$ (прогноз)

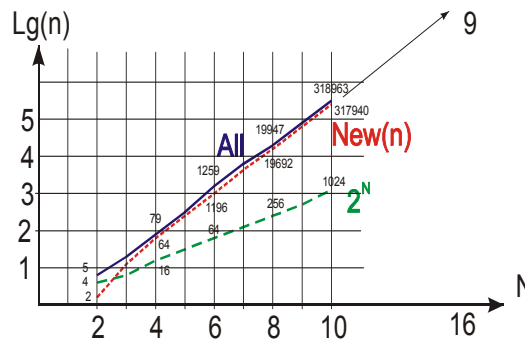


Рис. 22. Кількості поділок на шкалах класичного частотомера коінциденції від збільшення розрядності лічильників

Встановлено, що із збільшенням розрядності лічильників кількість поділок на вимірювальній шкалі різко зростає (в показникові ступені), що відображено логарифмічним масштабом кількості позначок шкали (рис.19), і в такій же залежності збільшується виграш за роздільною здатністю дробово-раціональної шкали частотомера коінциденції. Так при 10-розрядних лічильників виграш вже сягає більше ніж у 300 разів.. Досліджено потенційні можливості вимірювання частоти, які дозволили встановити ієрархічну залежність методів вимірювання частоти рис.11, із якої слідує що метод коінциденції є найвищим ступенем, а всі відомі є його частковими випадками.

Для цифрових методів вимірювання частоти в РТС і ТКС було встановлено, що тепер в рамках фазочастотного аналізу ієрархічна система методів вимірювання має вигляд рис.23, враховуючи також методи оптимальної обробки, вагової обробки, та послідовного наближення, переваги методу коінциденції наглядно підтверджує об'ємна модель шкали коінциденції, а саме збільшення додаткових точок Квантової шкали вимірювального перетворення рис.24.

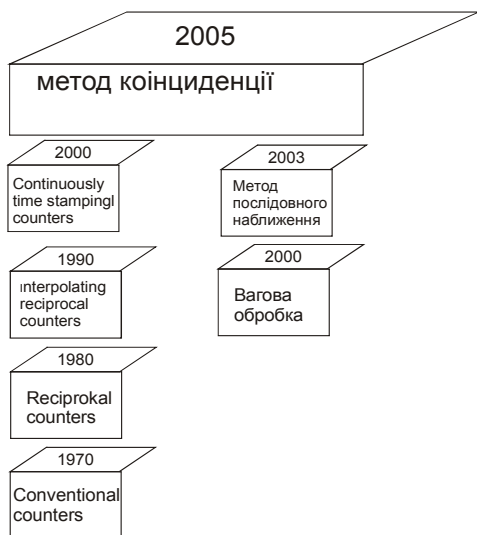


Рис.23. Ієрархія цифрових методів вимірювання частоти та їх хронологія

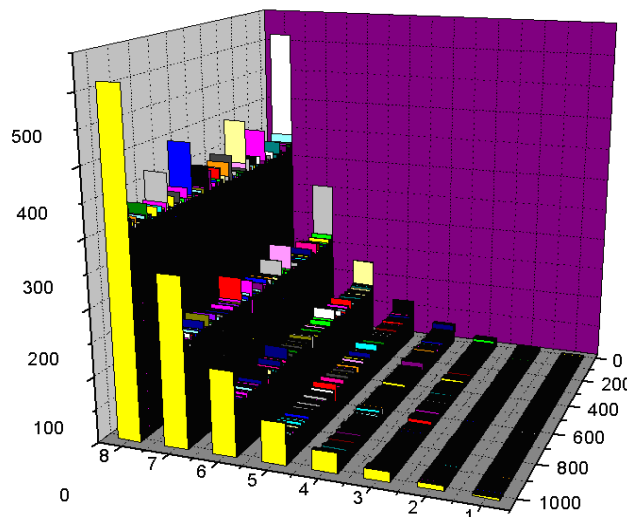


Рис.24. Збільшення додаткових точок КШВП

В результаті проведених досліджень розроблено математичну модель вимірювального перетворення частоти в код за методом коінциденції, і доведено що лише він забезпечує суттєве, 10-1000 разів покращити параметр *точність/швидкість* вимірювань, крім того за своїми методичними та структурними особливостями, він є найвищим рівнем в системі ієрархії цифрових частотомерів.

Практичні випробування частотомерів та вимірювальних перетворювачів дали унікальні результати можливості вимірювання частоти з розрізненням у одиниці Гц за одиниці мілісекунд (а не секунду) на частотах порядку МГц, роздруківки вимірювань наведено на рис. 25.



A = 5713, B = 35, FRC = 98022 Hz, T = 0.71412 ms	A = 897, B = 28, FRC = 499442 Hz, T = 0.11213 ms
A = 2122, B = 13, FRC = 98020 Hz, T = 0.26525 ms	A = 2659, B = 83, FRC = 499435 Hz, T = 0.33237 ms
A = 5713, B = 35, FRC = 98022 Hz, T = 0.71412 ms	A = 897, B = 28, FRC = 499442 Hz, T = 0.11213 ms
A = 13548, B = 83, FRC = 98021 Hz, T = 1.69350 ms	A = 1762, B = 55, FRC = 499432 Hz, T = 0.22025 ms
A = 5713, B = 35, FRC = 98022 Hz, T = 0.71412 ms	A = 897, B = 28, FRC = 499442 Hz, T = 0.11213 ms
A = 19261, B = 118, FRC = 98021 Hz, T = 2.40762 ms	A = 897, B = 28, FRC = 499442 Hz, T = 0.11213 ms
A = 5713, B = 35, FRC = 98022 Hz, T = 0.71412 ms	A = 1794, B = 56, FRC = 499442 Hz, T = 0.22425 ms
A = 7835, B = 48, FRC = 98021 Hz, T = 0.97938 ms	A = 1762, B = 55, FRC = 499432 Hz, T = 0.22025 ms
A = 5713, B = 35, FRC = 98022 Hz, T = 0.71412 ms	A = 2659, B = 83, FRC = 499435 Hz, T = 0.33237 ms
A = 7838, B = 49, FRC = 100025 Hz, T = 0.97975 ms	A = 2659, B = 83, FRC = 499435 Hz, T = 0.33237 ms
A = 3839, B = 24, FRC = 100026 Hz, T = 0.47987 ms	A = 897, B = 28, FRC = 499442 Hz, T = 0.11213 ms
A = 19355, B = 121, FRC = 100025 Hz, T = 2.41937 ms	A = 32, B = 1, FRC = 500000 Hz, T = 0.00400 ms
A = 7678, B = 48, FRC = 100026 Hz, T = 0.95975 ms	A = 897, B = 28, FRC = 499442 Hz, T = 0.11213 ms
A = 3839, B = 24, FRC = 100026 Hz, T = 0.47987 ms	A = 2659, B = 83, FRC = 499435 Hz, T = 0.33237 ms
A = 3839, B = 24, FRC = 100026 Hz, T = 0.47987 ms	
A = 160, B = 1, FRC = 100000 Hz, T = 0.02000 ms	
A = 15516, B = 97, FRC = 100025 Hz, T = 1.93950 ms	
A = 3839, B = 24, FRC = 100026 Hz, T = 0.47987 ms	

Рис.25. Роздруківки результатів випробувань частотоміра

Іншим прикладом який вказує на принципові обмеження класичного визначення частоти може слугувати періодичний сигнал *Sinc* (Інтегральний синус), який має унікальні можливості у спектральному представленні, а питання визначення частоти для нього взагалі втрачає сенс, особливо якщо розглянути спектральні складові таких сигналів. Типовий вигляд отримання таких сигналів сучасним синтезаторами та їх вигляд на екрані цифрового осцилографа приведено на рис.26.



Рис. 26. Формування сигналу (періодичного) типу Sinc

Якщо для синтезатора FY3200 (рис.26) питання формування сигналів у діапазоні до 10 МГц, дає гарну візуальну картинку на екрані осцилографа, то питання вимірювання частоти вмонтованого частотоміра 100 мілігерц.

Для FY2300 (60 МГц) (рис.27, рис.28), робота на частотах вище 25 МГц буде істотно спотворювати картинку, так як 14біт ЦАП і 250 Мв/с, буде вносити значну похибку квантування на бокових пелюстках сигналу. Іншим принциповим моментом, той факт що крок зміни частоти – 1 мікрогерц, а частотомір МА роздільну здатність всього 10мілігерц.

Окремою проблемою вимірювання частоти є забезпечення точності вимірювання (роздільної здатності порядку  $10^{-14}$ - $10^{15}$ , що складає 100нГц!!! Були проведено практичні випробування роздільної здатності CNT-90, проведені на вторинному еталоні частоти України, (рис.28), які підтвердили що максимальна чутливість не перевищує 500мкГц, що на  $10^3$ - $10^4$ , недостатньо для проведення вимірювань зміни частоти від гравітаційних сил. На рис.28 приведено фото практичних вимірювань частотоміром CNT-90.

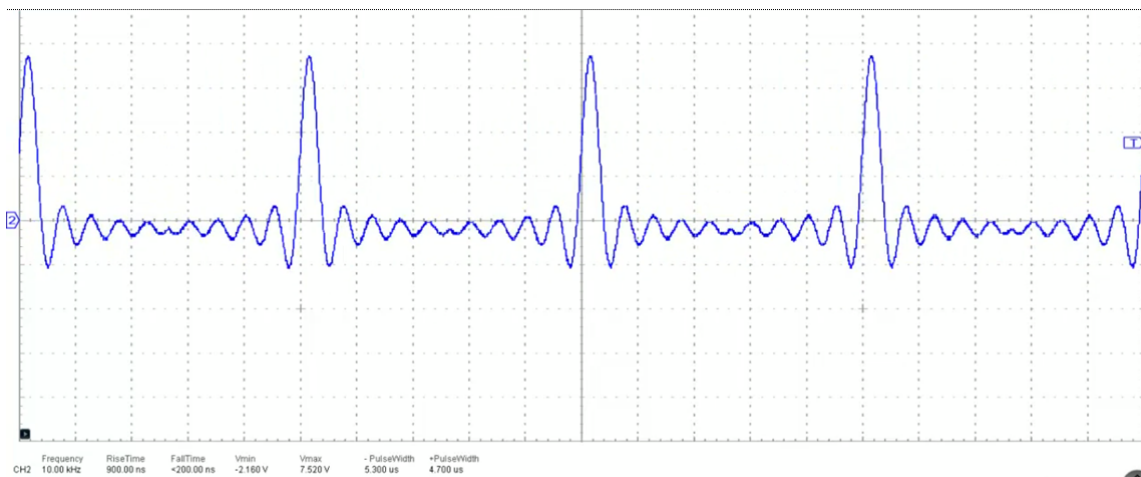


Рис. 27. Формування сигналу (періодичного) типу Sinc для FY2300 (60 МГц)



Рис.28 . Практичні вимірювання частоти із розділення менше 1млГц



Рис.29 . Еталонний час Києва



Рис.30 . Водяні еталони частоти



FY2300H-60M Signal Generator



Рис.31. Частотомір CNT-91 та генератор «мікрогерцових частот»

**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. 32) 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 набудуть аналітичної доказової бази і можуть слугувати методичним матеріалом уже 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;

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

$\Delta_f$  - абсолютна похибка вимірювання частоти (роздільча здатність).

Так відомі методи [1,7,10] прийнято оцінювати за узагальненою формулою:

$$f_o \geq 3 \frac{f_x}{\Delta_f T_c} \tag{1}$$

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

$$\delta_{f_x} = \frac{3}{f_{on} T_{вим}} \tag{2}$$

Для методу коінциденції можливо записати систему рівнянь (3) які пов'язують вказані параметри і розглянуті в [8].

$$\left\{ \begin{aligned} T_{вим} &= \frac{N_{on}}{f_{op}} \\ f_x &= \frac{N_x}{N_{on}} f_{on} \\ \Delta f_x &\cong \frac{f_x}{2^{2n_{on}-2}} \\ \delta_{f_x} &\cong \frac{1}{2^{2n_{on}-2}} \end{aligned} \right. \tag{3}$$

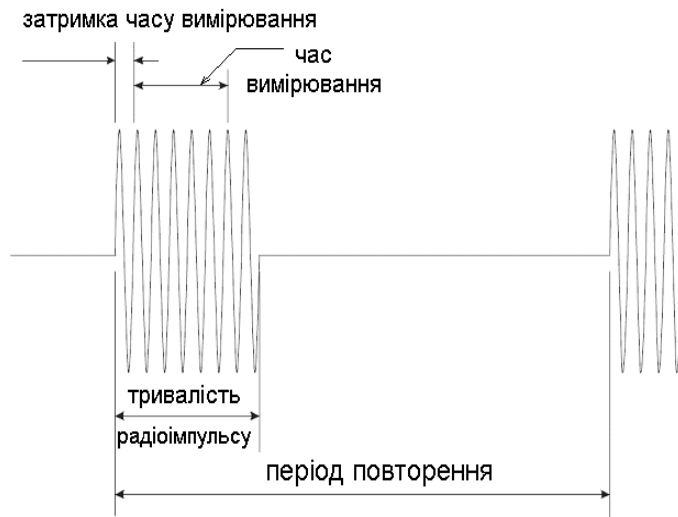


Рис.32. Радіоімпульсний сигнал

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 (рис.32) 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. Модель збільшення роздільчої здатності шкали (рис.32) зображена в тривимірних координатах (рис.32) де (0-1000) – класичні шкали при розрядності лічильників від 2 до 10 (1-8), та кількість додаткових поділок (100-500), в межах між поділками класичної шкали, утворюють шкалу відношень, яка відображає метод коінциденції, і дає покращення роздільчої здатності в середньому до 300 разів при N=10.

Із системи рівнянь (3) досить легко можливо знайти всі параметри частотоміра, і необхідний нам для порівняння комплексний параметр, який пов'язує визначальні величини, який можна записати як:

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

Методика проектування та метрологічного розрахунку вимірювача частоти за методом коінциденції

Проектування частотомірів за методом коінциденції подібне до розрахунків класичного обчислювального частотоміра із тією різницею, що вона базується на фазочастотному підході до визначення частотами (Теорія ФЧВ і ПР), а також використання дробово-раціональної шкали вимірювань (шкали відношень) яка утворюється при використанні методу коінциденції [7,8].

За основу беруть систему рівнянь (3) Дуже зручним є використання графіка збільшення роздільної здатності від розрядності представлення результатів у двійкових лічильниках рис.32.

Як правило, достатніми є використання 16-20 розрядних лічильників, для яких легко знайти оцінки роздільної здатності шкали вимірювань:

$$\text{Так, для } N = 16, \delta_{f_x} \cong \frac{1}{2^{2N_{он}-2}} = \frac{1}{2^{2 \cdot 16 - 2}} = \frac{1}{2^{30}} \sim 10^{-9}.$$

$$\text{Для } N = 20, \delta_{f_x} \cong \frac{1}{2^{2N_{он}-2}} = \frac{1}{2^{2 \cdot 20 - 2}} = \frac{1}{2^{38}} \sim 10^{-12}, \text{ що забезпечує роздільну здатність в од}$$

Герц в діапазоні 1-40ГГц, в якому працюють сучасні РТС і ТКС.

Питання часу вимірювання визначається вибором  $f_{он}$  - частоти опорного генератора (опорна частота вимірювань), яка для сучасної елементної бази може лежати в цьому ж діапазоні. Наприклад для

$$f_{он} = 1\text{ГГц}, T_{вим} = \frac{N_{он}}{f_{оп}} = \frac{2^{16}}{10^9} \sim 65 \text{ мікросекунд (максимальне значення).}$$

Наглядним є використання графіка залежності роздільної здатності у залежності від часу вимірювання для «найкращого у світі» частотоміра CNT-90 з нанесеними разом характеристиками частотоміра коінциденції рис.33.

При опорних частотах вище 10 МГц частотомір коінциденції значно більш точно і швидко вимірює частоту радіосигналів.

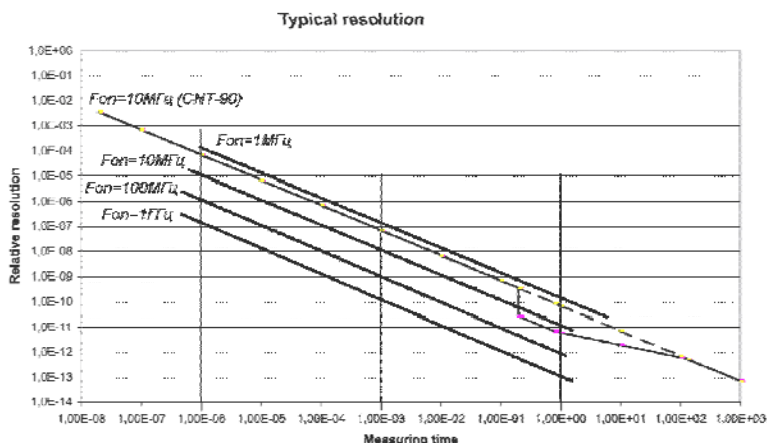


Рис. 33. Порівняння характеристик частотомірів коінциденції із «найкращим у світі» частотоміром CNT-90

### Висновки

На сучасному етапі розвитку цифрової частотометрії можливо рекомендувати наступну класифікаційну ієрархію методів вимірювання частоти, які подано у хронологічній послідовності та за рівнями ієрархії, по критерію точність x швидкодія вимірювань на рис. 8, де найвищим рівнем є метод коінциденції, а всі інші є похідними від нього частковими випадками, як до тепер таким вважався метод часових виборок реалізований у CNT-90.

Реалізація та використання методів вимірювання частоти за методом коінциденції у РТС і ТКС дозволить вирішити принципову проблему вимірювання частоти при апріорі невідомому часі існування сигналу.

Питанню визначення та дослідження похибок цифрових методів вимірювання частоти присвячено величезну кількість публікацій та доповідей як у вітчизняних [1-11] так і в зарубіжних джерелах [5-8], найбільш повний перелік таких посилань наведено в [5], а

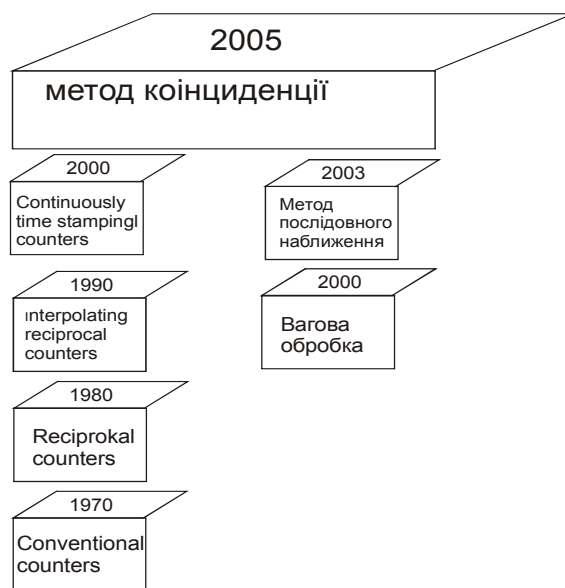


Рис.34. Ієрархія методів вимірювання частоти

також Datasheet провідних виробників частотомірів[1-78].

В той же час, у світі, поки що відсутнє систематизоване викладення цього питання із врахування нового класу вимірювачів частоти за методом коінциденції [5-8], які є найвищим ступенем ієрархії побудови цифрових частотомірів і мають ряд принципових відмінностей. Так в них відсутня методична похибка квантування (у її класичному розумінні) натомість всі акценти зміщуються у площину інструментальних похибок та похибок викликаних шумами. Тому висвітлення деяких особливостей цього питання потребує системного підходу і досить скрупульозного розгляду, що і буде розглядатись далі

### Література

1. [http/ www. Agilent.com](http://www.Agilent.com). Agilent Technologies, Understanding Frequency Counter Specifications, Applications, Note 200-4.
2. Fundamentals of the Electronic Counters . Application Note 200. Electronic Counter Series. Hewlett-Packard Co.
3. Пат. США . №3924183. J. C. Fletcher, Frequency measurement by coincidence detection with standard frequency. U. S. Patent 3, 924,183. 1975.
4. D. Hernández B., V. E. Tyrsa. Método para la medición de frecuencia usando aproximaciones racionales. Revista Mexicana de Física, 52 (4) 359-364. 2006.
5. J. C. Fletcher, Frequency measurement by coincidence detection with standard frequency. U. S. Patent 3, 924,183. 1975.
6. D. Hernández B., V. E. Tyrsa. Método para la medición de frecuencia usando aproximaciones racionales. Revista Mexicana de Física, 52 (4) 359-364. 2006.
7. L. Bursrtseva, V. E. Tyrsa. Maedición de la frecuecnia según el método de las aproximaciones racionales. Electro 2002. Octubre 2002. ISSN 1405-2172. pp 441-446.
8. Троцишин І.В. Квантова теорія вимірювального перетворення: принципи та методологія, на шляху від частотоміра коінциденції до атенюатора-подільника Троцишина / І.В. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – №1. – С.27-37. [http://elibrary.ru/cit\\_title\\_items.asp?id=38428](http://elibrary.ru/cit_title_items.asp?id=38428)
9. Троцишина Н.І. Атенюатор-подільник Троцишина як базовий функціональний елемент нових принципів вимірювального перетворення ЦАП-АЦП / Н.І. Троцишина, І.В. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – №1. – С.118-120. <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1260975>
10. Троцишин І.В. Методология построения ЦАП-АЦП с программируемыми параметрами характеристики преобразования на сонове атенюатора-дделителя Троцишина и их исследование / И.В. Троцишин, Н.И. Троцишина, М.И. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. - №2. – С. 50-56. <http://elibrary.ru/item.asp?id=21167140>.
11. Пат. України 100581. Спосіб побудови атенюатора-подільника Троцишина./ Троцишин І.В.// МПК (2013.01) G01R 15/00 G06G 7/16 (2006.01) G11C 8/00 H02M 3/06 (200),Опубліковано 10.01.2013, Бюл. № 1.

### References

1. [http/ www. Agilent.com](http://www.Agilent.com). Agilent Technologies, Understanding Frequency Counter Specifications, Applications, Note 200-4.
2. Fundamentals of the Electronic Counters . Application Note 200. Electronic Counter Series. Hewlett-Packard Co.
3. Пат. США . №3924183. J. C. Fletcher, Frequency measurement by coincidence detection with standard frequency. U. S. Patent 3, 924,183. 1975.
4. D. Hernández B., V. E. Tyrsa. Método para la medición de frecuencia usando aproximaciones racionales. Revista Mexicana de Física, 52 (4) 359-364. 2006.
5. J. C. Fletcher, Frequency measurement by coincidence detection with standard frequency. U. S. Patent 3, 924,183. 1975.
6. D. Hernández B., V. E. Tyrsa. Método para la medición de frecuencia usando aproximaciones racionales. Revista Mexicana de Física, 52 (4) 359-364. 2006.
7. L. Bursrtseva, V. E. Tyrsa. Maedición de la frecuecnia según el método de las aproximaciones racionales. Electro 2002. Octubre 2002. ISSN 1405-2172. pp 441-446.
8. I. V. Trotsishin. Quantova teoriya vimiryuvalnogo peretvorenniya: principy ta metodologiya na shlahu vid chastotomira kointsidentsii do attenuatora-podilnika Trotsishina / I.V. Trotsishin // Vimiryuvalna that obchislyuvalna tehnika in tehnologichnih processes. - 2013.- №1.- С.27-37. [http://elibrary.ru/cit\\_title\\_items.asp?id=38428](http://elibrary.ru/cit_title_items.asp?id=38428)
9. N.I. Trotsishina. Attenuator-podilnik Trotsishina yak Basovyy funktsionalnyy element novih printsipiv vimiryuvalnogo peretvorenniya DAC-ADC / N.I. Trotsishina, I.V. Trotsishin // Vimiryuvalna that obchislyuvalna tehnika in tehnologichnih protsesah.- 2013.- №1.- С.118-120. <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1260975>
10. I.V. Trotsishin. Methodology postroeniaCAP-ACP z programiruemyimi karakteristikami preobrazovania na osnove attenuatora-dlelatelya Trotsishina I ih issledovanie / IV Trotsishin. NI Trotsishin, MI Trotsishin // Vimiryuvalna that obchislyuvalna tehnika in tehnologichnih processes. - 2013. - №2. - S. 50-56. <http://elibrary.ru/item.asp?id=21167140>.
11. Patent Ukraine 100581. Sposib pobudovi attenuatora-podilnika Trotsishina. / Trotsishin I.V. // IPC (2013.01) G01R 15/00 G06G 7/16 (2006.01) G11C 8/00 H02M 3/06 (200) Published 01.10.2013, Bull. Nomer 1.

Рецензія/Peer review : 6.10.2016 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2016 р.

Рецензент: