



## Новий державний еталон одиниці девіації частоти частотно-модульованих коливань

П.І. Неєжмаков, Ю.Ф. Павленко, В.І. Огар, О.М. Васильєва,  
С.Р. Кириєнко

Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мירוносицька, 42, 61002, Харків, Україна  
iurii.pavlenko@metrology.kharkov.ua

### Анотація

Статтю присвячено огляду основних результатів науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, що виконувались під час удосконалення державного первинного еталона одиниці девіації частоти. Наведено аналіз ситуації, яка склалась у галузі вимірювання параметрів частотно-модульованих коливань в Україні й привела до необхідності вдосконалення створеного в 1996 р. ДПЕ одиниці девіації частоти, а саме до необхідності суттєвого підвищення метрологічних характеристик і розширення функційних можливостей еталона. Оскільки одним із кардинальних рішень при вдосконаленні еталона стало використання в ньому цифрових генераторів сигналів, які побудовані на базі DDS-технології (прямого цифрового синтезу) і її подальшої версії – Trueform, у статті викладено результати ретельного аналізу метрологічних можливостей цих генераторів, розроблених оригінальних методів їх дослідження і одержаних нових результатів щодо їхніх характеристик у режимі ЧМ.

Під час удосконалення в еталоні використано і досліджено новий спосіб прийому ЧМ сигналу, що ґрунтується на використанні аналізатора спектра і опції – аналого-цифрового демодулятора. Проведено автоматизацію керуючих і обчислювальних операцій на еталоні на базі програми Labview.

У результаті роботи створено еталонний комплекс, який за своїми метрологічними характеристиками і функційними можливостями здатний калібрувати не тільки ЗВТ в галузі ЧМ, а й широкую номенклатуру радіовимірювальних приладів як приймального, так і генеруючого видів.

**Ключові слова:** частотна модуляція; девіація частоти; цифрові генератори сигналів; еталон; невизначеність.

Отримано: 28.04.2020

Відредаговано: 05.06.2020

Схвалено до друку: 12.06.2020

### Вступ

Державний еталон одиниці девіації частоти (ДЧ) – основного параметра сигналів з кутовою модуляцією (частотною – ЧМ або фазовою – ФМ) – призначений для забезпечення єдності вимірювань параметрів цих сигналів.

Основними галузями використання ЧМ/ФМ сигналів є радіозв'язок в УКВ-діапазоні, радіолокація і радіонавігація, телебачення, радіовимірювальна техніка [1, 2], а основними видами засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) є вимірювальні ВЧ- і НВЧ-генератори, вимірювачі модуляції, аналізатори спектра, вимірювальні приймачі.

Метрологічне забезпечення всіх ЗВТ у цій галузі успішно виконувалось за допомогою еталона ДЕГУ 09-03-95 протягом майже 25 років [3]. Але на цей час еталон фізично й морально застарів і вимагав удосконалення в технічному, технологічному та метрологічному планах.

Основними моментами, що враховувались при вдосконаленні державного еталона, були:

а) Фізичне і моральне старіння так званої вітчизняної техніки (випущеної в межах СРСР і СНД) і масове розповсюдження в Україні закордонних ЗВТ з їхніми особливостями й суттєво вищими метрологічними та технічними характеристиками. Ця обставина потребує адаптації вітчизняної інфраструктури метрологічного забезпечення (апаратури, методів вимірювання, програмного забезпечення, нормативної документації), а також еталона, що вдосконалюється, до нових умов.

б) Підвищення важливості параметрів ЧМ/ФМ коливань, які характеризують *якість* сигналів. Хоча девіація частоти залишається основним інформативним параметром, в останні роки не менш важливими стали "паразитні" параметри, або параметри якості, до яких відносяться: *коефіцієнт гармонік (КГ) закону ЧМ, супутня амплітудна модуляція (АМ) і паразитний шум (частотний і фазовий)*. Тому необхідним стало розширення функціональних можливостей еталона за числом

параметрів, за якими він може проводити калібрування.

в) Необхідність калібрувати не тільки вторинні й робочі еталони ДЧ, але й усі види ЗВТ в галузі КМ, названі вище.

Саме з урахуванням усіх цих факторів проводилось удосконалення еталона.

### 1. Принцип побудови і функційна схема еталона

Удосконалений еталон повинен мати функції як вимірювального приймача ЧМ/ФМ сигналу, так і міри ДЧ – джерела прецизійного сигналу з кутовою модуляцією. Таким чином, до складу еталона входять такі системи (рис. 1):

- генеруюча система (ГС);
- приймально-вимірювальна система;
- система передавання (СП);
- керуюча обчислювальна система.

#### 1.1. Генеруюча система

Одним із кардинальних удосконалень еталона стала заміна аналогових ЧМ-генераторів, які використовувались у ДЕТУ 09-03-95, на цифрові [4–7]. В основі цифрових методів синтезу сигналів лежить теорема Котельнікова – Найквіста [8]. Цифрові методи є основними сучасними методами формування сигналів і мають незаперечні переваги, саме з точки зору якості сигналу. Аналогове формування ЧМ сигналів, залежно від своєї природи, супроводжується рядом паразитних явищ: *нелінійними спотвореннями частотної модуляції* (через неідеальну лінійність модуляційної характеристики), *супутньою АМ* (через параметричні явища), *фазовими (частотними) шумами* і пов'язаними з цими явищами похибками (невизначеностями) вимірювання ДЧ.

Принципово інша ситуація складається при використанні цифрових методів формування,

коли ЧМ сигнал задається в аналітичному вигляді, обробляється за спеціальною програмою в процесорі генератора, кодується і т.д., після чого синтезується в аналоговий сигнал за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). У такому генераторі відсутні пристрої, які є джерелами похибок в аналогових генераторах завдяки іншому механізму формування сигналу і виникнення спотворень. Іншими словами, як цифрова обробка і цифрові методи вимірювань докорінно відрізняються від аналогових (і мають, як правило, більш широкі метрологічні можливості), так і в цьому разі ми отримуємо принципово нове – цифрове за суттю – джерело еталонного сигналу.

Цифрові генератори, що можуть бути використані як еталонні джерела сигналів, будуються на принципі *прямого цифрового синтезу* (ПЦС) або, в англійській аббревіатурі, Direct Digital Synthesis (DDS) [4, 5]. Якщо в аналогових генераторах джерелом домінуючої похибки (наявність КГ) є модулятор, то в DDS-генераторах – ЦАП, зокрема, його скінченна розрядність. Подальшим розвитком DDS-технології побудови генераторів стала Trueform-технологія, яка, згідно з прогнозами фірми-розробника, здатна забезпечити ще вищі якісні показники сигналу.

Технологія DDS використовує фіксовану тактову частоту і спрощену схему фільтрації. В цьому методі не кожна задана точка відбивається в результуючому вихідному сигналі, тому сигнал до деякої міри спотворюється. Нюанси сигналу можуть повністю або частково ігноруватися.

Нова технологія Trueform дозволяє створювати сигнали довільної форми з низьким рівнем шуму без пропуску точок. Однією з ключових переваг технології Trueform у порівнянні з DDS є краща цілісність сигналу. Trueform відтворює кожен точку сигналу, незалежно від встановленої час-



Рис. 1. Функціональна схема еталона

тоти сигналу або частоти дискретизації. Це стає актуальним, коли сигнали містять тонкі деталі, критичні для виконання вимірювань [6, 7].

В удосконаленому еталоні використовуються обидва види генераторів, і питання оцінки параметрів ЧМ сигналів, одержаних за допомогою DDS-і Trueform-технологій, стали одним із предметів досліджень при створенні нового еталона, результати яких будуть наведені в окремій статті.

Для використання в еталоні було обрано генератори *Agilent 5172B* (DDS-технологія) і *Keysight 33611A* (Trueform) [4–7].

### 1.2. Приймально-вимірвальна система

Ця система включає до себе апаратуру для прийому радіосигналів (аналізatori спектра) і вимірювання (калібрування) девіації частоти. Як прецизійні методи калібрування ДЧ використовуються метод “нулів функції Бесселя” (НФБ) і цифровий метод, який одержав у літературі назву “методу електронно-лічильного частотоміра” (метод ЕЛЧ) [9, 10]. Обидва методи докладно описано в літературі, тому підкреслимо лише особливості їх використання в еталоні.

Первинним і референтним методом [11] відтворення ДЧ є метод НФБ, який ґрунтується на фундаментальних властивостях спектра ЧМ сигналу.

Спектральний розклад ЧМ сигналу з гармонійною модуляцією має вигляд:

$$u(t) = U_m \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} J_{\lambda}(\beta) \sin(\omega + \lambda\Omega)t, \quad (1)$$

де  $J_{\lambda}(\beta)$  – функція Бесселя першого роду  $\lambda$ -го порядку.

Оскільки амплітуди спектральних складових ЧМ сигналу з гармонійною модуляцією виражаються через функції Бесселя від індексу модуляції  $J(\beta)$  (рис. 2), можна виміряти  $\beta$ , застосовуючи співвідношення:  $U_m I_{\lambda}(\beta) = 0$ , тобто властивість функцій Бесселя приймати нульові значення.

Амплітуда  $\lambda$ -ої спектральної складової:

$$U_{\lambda} = U_m J_{\lambda}(\beta). \quad (2)$$

Бесселева функція є квазіперіодичною загасаючою функцією (рис. 3), корені якої (перетинання з віссю  $\beta$ ) табульовані з високою точністю. З огляду на (1), (2), можна виміряти  $\beta$ , застосовуючи співвідношення:

$$U_m J_{\lambda}(\beta) = 0. \quad (3)$$

Можна встановлювати  $\beta = \beta_{0n}$ , де  $\beta_{0n}$  –  $n$ -й “нуль”  $\lambda$ -ої спектральної складової.

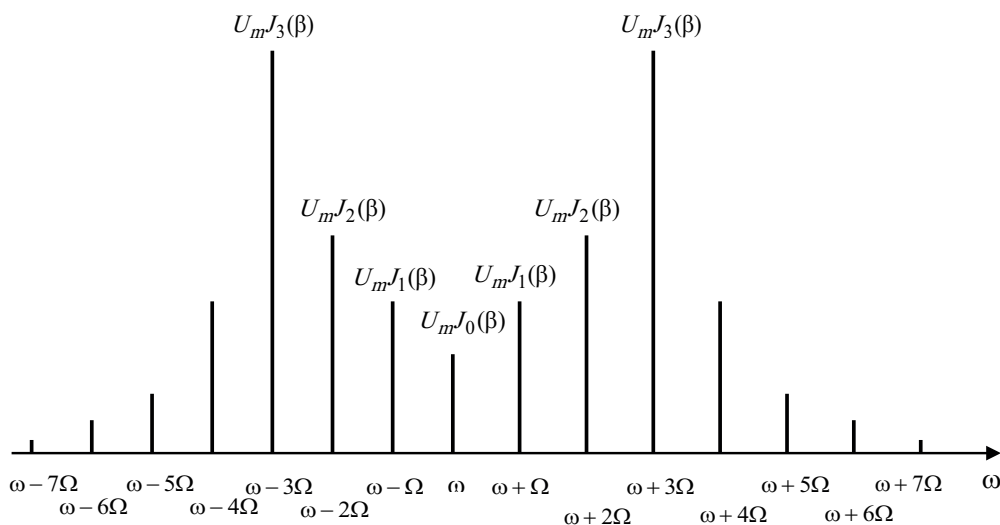


Рис. 2. Спектральний розклад ЧМ сигналу

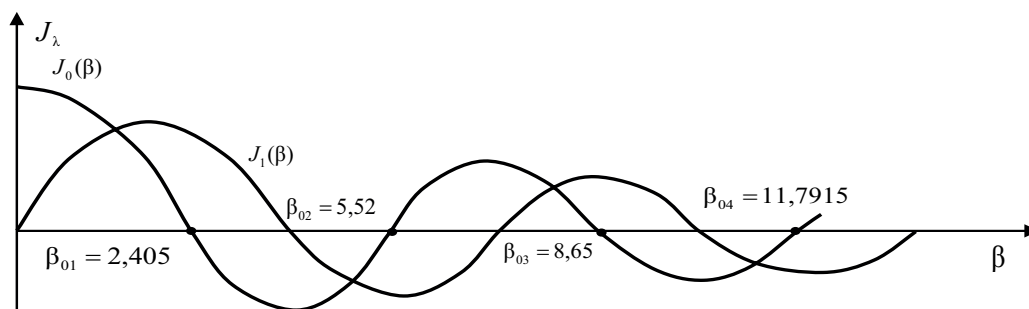


Рис. 3. Бесселеві функції  $J_0(\beta)$ ,  $J_1(\beta)$

Метод реалізується в широкому діапазоні несучих і модулюючих частот за допомогою аналізатора спектра (АС).

Оскільки  $n$  і  $\lambda$  нам відомі,  $\beta_{0n}$  знаходиться за таблицями, а шукана девіація визначається за формулою  $\Delta f = \beta_{0n} F$ .

**Метод ЕЛЧ** відноситься до методів вимірювань середнього значення миттєвої частоти ЧМ сигналу за інтервал часу, що є порівняним або перевищує період модулюючого коливання. ЧМ сигнал з гармонійною модуляцією змішується із сигналом гетеродина, на виході змішувача виділяється сигнал із низькою різницевою частотою  $\omega \ll \Delta\omega$ , який подається на ЕЛЧ:

$$u = U_m \sin[\omega t + (\Delta\omega / \Omega) \sin \Omega t]. \quad (4)$$

При цьому обов'язковою є умова  $\omega \ll \Delta\omega$ .

При виконанні деяких умов [8, 9] показ ЕЛЧ за стандартний час лічби 1 с буде:

$$N = N_F F = \frac{\Delta f}{(\pi/2)}. \quad (5)$$

Метод забезпечує високу точність при великих і середніх індексах модуляції, тобто при

$$\beta = \frac{\Delta f}{F} \geq 10.$$

Ще один метод вимірювання, який використовується в еталоні, — *це метод демодуляції за допомогою АС з опцією К7*.

Метод полягає в реалізації на базі АС R&S FSL (який відіграє роль переносника ЧМ сигналу на проміжну частоту) і опції К7 (аналого-цифрового демодулятора) функцій аналізатора модуляції (вимірювального приймача-девіометра), який здатний вимірювати ДЧ і КГ ЧМ сигналу в широких діапазонах ДЧ і F [12].

Особливістю цього приймача-девіометра, у порівнянні з аналоговим девіометром СКЗ-45, є застосування *цифрового* методу демодуляції в опції К7, який, за аналогією з цифровим генератором, забезпечує детектування в більш широкому діапазоні ДЧ (до 8 МГц) з малими спотвореннями.

Демодуляція ЧМ сигналу в опції К7 аналізатора спектра (рис. 4) відбувається шляхом перенесення модульованого сигналу на проміжну частоту, одержання квадратурних вибірок ЧМ сигналу  $I, Q$ , їх аналого-цифрового перетворення в коди і математичної обробки в процесорі для знаходження миттєвих значень амплітуди  $A(t)$ , фази  $\varphi(t)$  і частоти  $\omega(t)$  сигналу

$$A(t) = \sqrt{I^2 + Q^2}; \quad \varphi(t) = \arctg \frac{Q}{I}; \quad \omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Такий демодулятор виділяє закон модуляції  $\omega(t)$  і, як показали наші дослідження, практично не вносить власних нелінійних спотворень. Завдяки алгоритму швидкого перетворення Фур'є демодульованого сигналу обчислюються парціальні девіації частоти і параметр THD (Total Harmonic Distortion), тобто сумарний КГ закону модуляції ЧМ сигналу:

$$КГ_{ГЧМ} = THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\omega_i)^2}{\Delta\omega_1^2}} \cdot 100\%.$$

### 1.3. Система передавання розміру одиниці

Передавання розміру одиниці ДЧ від еталона до вторинного і робочого еталонів ДЧ, а також ЗВТ генераторного виду здійснюється методом компарування [9, 10]. Метод полягає в послідовній подачі на приймач-компаратор еталонного сигналу і сигналу робочого або вторинного еталона, який

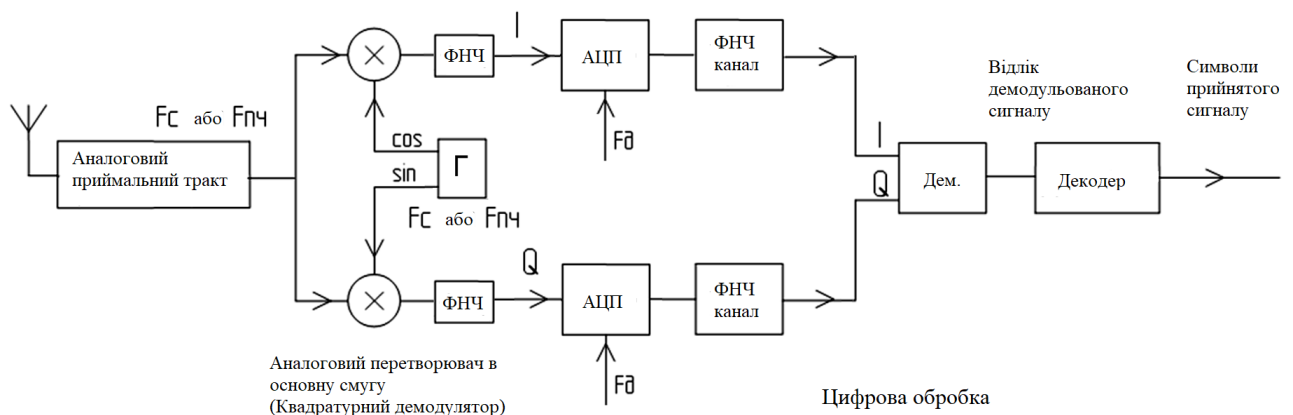


Рис. 4. Функціональна схема цифрового демодулятора АС R&S FSL+ К7

Метрологічні характеристики генераторів ЧМ сигналів

Генератор	Коефіцієнт гармонік КГ, %	Супутня АМ % при $\Delta f = 1$ МГц	Шумова ЧМ, Гц (частотний шум) при $f = 50$ МГц
Keysight 33611A	<0,02% ( $\Delta f = 0,5$ МГц) <0,04% ( $\Delta f = 1$ МГц)	<1%	0,5 (смуга 0,3 – 3,4 кГц) 0,8 (смуга 0,02 – 3,4 кГц) 2,2 (смуга 0,02 – 20 кГц)
Agilent 5172B	<0,02% ( $\Delta f = 0,5$ МГц) <0,04% ( $\Delta f = 1$ МГц)	<1%	0,6 (смуга 0,3 – 3,4 кГц) 0,9 (смуга 0,02 – 3,4 кГц) 3,3 (смуга 0,02 – 20 кГц)

калібрується. Як приймач-компаратор використовується вимірювач модуляції СКЗ-45 з пристроєм для розширення його роздільної здатності та обробки результатів багаторазових спостережень.

**1.4. Керуюча та обчислювальна система (КОС)**

У процесі удосконалення розроблено програму і засоби керування роботою еталона від персонального комп'ютера у середовищі Labview в усіх режимах його роботи [12].

У програмі передбачено проведення багаторазових спостережень з обчисленням результатів вимірювань. Використовуються стандартні інтерфейсні програмні модулі Labview для керування приладами фірм Rohde&Shwarz, Keysight, Keithly та ін.

**2. Дослідження еталона**

**2.1. Дослідження метрологічних властивостей системи генерування**

Якісні параметри еталонних сигналів (КГ закону ЧМ, супутня АМ, шумова ДЧ) є джерелами домінуючих складових невизначеності відтворення ДЧ, тому їх визначення було основним завданням дослідження. Треба було виміряти дуже малі параметри спотворень, значно менші за роздільну здатність існуючих засобів їх вимірювання.

Тому використовувався весь арсенал відомих методів і підходів, Докладний опис цих досліджень виходить за межі цієї статті, наведемо

лише отримані узагальнені результати в діапазоні ДЧ до 1000 кГц, в якому працював ДЕТУ 09-03-95 (табл. 1). Як бачимо, якісні параметри використаних цифрових генераторів значно вищі (спотворення всіх видів значно менші), ніж у аналогових генераторів, які були спеціально розроблені під еталон ДЕТУ 09-03-95. Ці висновки добре співпадають із результатами досліджень, наведеними в [13].

**2.2. Оцінка метрологічних характеристик генераторів у розширеному діапазоні (при ДЧ > 1000 кГц і F > 200 кГц)**

Цифрові генератори дозволяють отримати значно більші девіації частоти, ніж аналогові. Так обрані для використання в еталоні генератори мають ДЧ до 8 МГц при модулюючих частотах до 500 кГц (ДЕТУ 09-03-95 мав ДЧ до 1 МГц при F до 200 кГц). Ця властивість також є дуже важливою, але якісні параметри генераторів у розширеному діапазоні не нормовані. Це вимагало додаткових досліджень.

Пошуки привели нас до можливості використання аналізатора спектра R&S FSL з опцією K7, про який сказано вище. Виявилось, що ця апаратура здатна вимірювати THD (коефіцієнт гармонік – КГ) і параметр SINAD (КГ +шум) у діапазоні ДЧ до 8 МГц при  $F \leq 500$  кГц.

На рис. 5 показано залежність сумарного КГ (генератора і демодулятора) від ДЧ (вісь абсцис) і F.

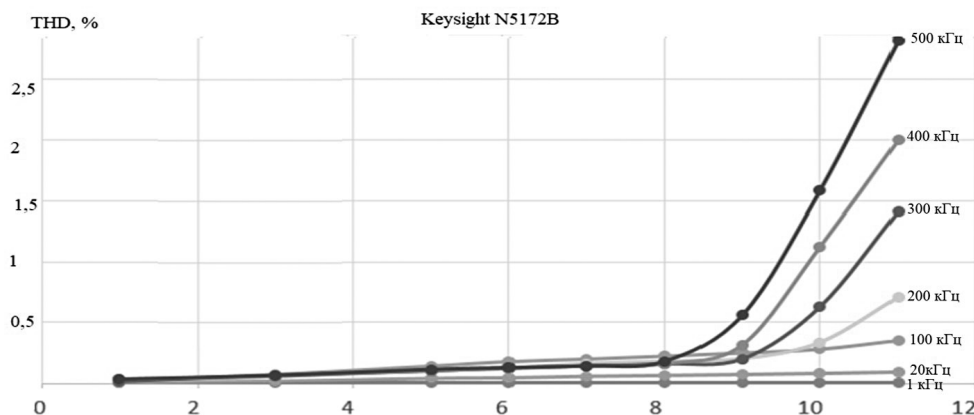


Рис. 5. Залежність КГ від  $\Delta f / F$  для генератора 5172B

**2.3. Оцінка складових невизначеності**

**Основний діапазон** (при ДЧ до 1000 кГц,  $F$  до 200 кГц)

Оцінка невизначеності за типом А проводилася статистичним методом, тобто використанням багаторазових спостережень. Одержана стандартна невизначеність результату вимірювань за типом А ( $u_A$  – див. табл. 2) для обох методів не перевищує  $3 \times 10^{-4}$ .

Проведені розрахунки за результатами експериментальних досліджень дали такі оцінки складових невизначеності еталона:

- стандартна невизначеність за типом А –  $3 \times 10^{-4} \Delta f$ ;
- стандартна невизначеність за типом В –  $(2-4) \times 10^{-4} \Delta f$ ;
- сумарна стандартна невизначеність –  $5 \times 10^{-4} \Delta f$ ;
- розширена невизначеність ( $k = 2, p = 0,95$ ) –  $10 \times 10^{-4} \Delta f$ ;
- стандартна невизначеність передавання розміру одиниці –  $5 \times 10^{-4} \Delta f$ .

**У розширеному діапазоні** (ДЧ від 1 до 8 МГц,  $F$  від 200 до 500 кГц) невизначеності не перевищують:

- стандартна невизначеність за типом А –  $(3-5) \times 10^{-4} \Delta f$ ;
- стандартна невизначеність за типом В –  $(5-10) \times 10^{-4} \Delta f$ ;
- сумарна стандартна невизначеність –  $(5-12) \times 10^{-4} \Delta f$ ;
- розширена невизначеність ( $p = 0,95, k = 2$ ) –  $(10-25) \times 10^{-4} \Delta f$ ;
- стандартна невизначеність передавання розміру одиниці –  $(5-10) \times 10^{-4} \Delta f$ .

**Ключовим експериментом** для оцінки правильності та достовірності оцінки невизначеності вимі-

рювань є порівняння результатів вимірювання ДЧ двома незалежними методами (НФБ і ЕЛЧ). Цей експеримент було проведено для багатьох значень ДЧ з охопленням середніх і великих значень девіації частоти. Було одержано відносну розбіжність результатів вимірювання від 0,02% до 0,06%, тобто в межах оціненої невизначеності.

**3. Основні метрологічні й технічні характеристики еталона наведено в табл. 2**

**Переваги удосконаленого еталона:**

- більш широкі діапазони ДЧ і  $F$ ;
- менша невизначеність відтворення і передавання одиниці ДЧ;
- більш високі якісні параметри (менші значення КГ, супутньої АМ, шумів);
- ширші функціональні можливості;
- високий рівень комп'ютеризації й автоматизації.

**Висновки**

1) Введення до складу еталона ДЕТУ 09-03-96 у процесі його вдосконалення замість аналогових генераторів нових ЧМ генераторів фірми Agilent і Keysight, синтез частоти в яких здійснюється за DDS-технологією (та її подальшою версією – Trueform), дозволило суттєво знизити нелінійні спотворення, супутню АМ і шуми еталонних ЧМ сигналів, а разом з цим і сумарну невизначеність еталона.

2) Нові метрологічні й експлуатаційні можливості відкриває використання як приймача ЧМ сигналів аналізатора спектра з опцією цифрового демодулятора. У процесі роботи були досліджені його метрологічні можливості, оцінені характеристики (які раніше не нормувались), що дозволяє вважати його не просто сервісним обладнанням, а прецизійним вимірювальним приймачем.

Таблиця 2

Метрологічні й технічні характеристики еталона

№	Метрологічні характеристики	Основний діап.	Розширений діап.	Технічне завдання
1	Діапазон девіації частоти $\Delta f$	10 Гц – 1 МГц	1 МГц – 8 МГц	10 Гц – 1 МГц
2	Діапазон модулюючих частот $F$	20 Гц – 200 кГц	200 кГц – 500 кГц	20 Гц – 200 кГц
3	Діапазон несучих частот	10 МГц, 50 МГц до 6 ГГц	10 МГц, 50 МГц до 6 ГГц	–
4	Коефіцієнт гармонік при ЧМ	0,01–0,05%	0,02–0,05%	–
5	Стандартна невизначеність типу А $u_A$	$3 \times 10^{-4} \Delta f$	$(3-5) \times 10^{-4} \Delta f$	$5 \times 10^{-4} \Delta f$
6	Стандартна невизначеність типу В $u_B$	$(2-4) \times 10^{-4} \Delta f$	$(5-10) \times 10^{-4} \Delta f$	$(5-20) \times 10^{-4} \Delta f$
7	Сумарна невизначеність типу $\Sigma u_{\Sigma}$	$5 \times 10^{-4} \Delta f$	$(5-12) \times 10^{-4} \Delta f$	–
8	Розширена невизначеність $U_p$	$10 \times 10^{-4} \Delta f$	$(10-25) \times 10^{-4} \Delta f$	$(11-19) \times 10^{-4} \Delta f$
9	Стандартна невизначеність передавання $u_{\text{передав.}}$	$5 \times 10^{-4} \Delta f$	$(5-10) \times 10^{-4} \Delta f$	$5 \times 10^{-4} \Delta f$

3) Нові методи відтворення та вимірювання девіації частоти та схемно-апаратні рішення, впроваджені в еталоні, дозволили розширити частотні й модуляційні (за ДЧ і  $F$ ) діапазони еталона, що дозволить забезпечити єдність вимірювання параметрів ЧМ–ФМ у всіх галузях їх використання.

4) За своїми метрологічними характеристиками і функційними можливостями еталон далеко виходить за межі ТЗ і являє метрологічний комплекс, здатний калібрувати широку номенклатуру радіочастотних ЗВТ як приймального, так і генеруючого видів.

## Новый государственный эталон единицы девиации частоты частотно-модулированных колебаний

П.И. Неежмаков, Ю.Ф. Павленко, В.И. Огарь, Е.М. Васильева, С.Р. Кириенко

Национальный научный центр "Институт метрологии", ул. Мироносицкая, 42, 61002, Харьков, Украина  
[iurii.pavlenko@metrology.kharkov.ua](mailto:iurii.pavlenko@metrology.kharkov.ua)

### Аннотация

Приведен обзор основных результатов работ по усовершенствованию государственного первичного эталона единицы девиации частоты. Дан анализ ситуации в области измерения параметров частотно-модулированных колебаний в Украине, обоснована необходимость существенного повышения метрологических характеристик и расширения функциональных возможностей эталона. Одним из кардинальных решений стало использование цифровых генераторов сигналов, построенных на базе DDS-технологии и ее дальнейшей версти – Trueform. Приведены результаты анализа метрологических возможностей этих генераторов, оригинальные методы их исследования, характеристики в режиме ЧМ. Исследован способ приема ЧМ сигнала с помощью анализатора спектра и опции аналого-цифрового демодулятора. Проведена автоматизация управляющих и вычислительных операций на базе программы Labview.

В результате работы создан эталонный комплекс для калибровки, широкой номенклатуры радиоизмерительных приборов приемного и генерирующего видов.

**Ключевые слова:** девиация частоты; цифровые генераторы сигналов; эталон; неопределенность.

## The new state measurement standard of the unit of frequency deviation of frequency-modulated oscillations

P. Neyezhnikov, Yu. Pavlenko, V. Ogar, O. Vasilieva, S. Kirienko

National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine  
[iurii.pavlenko@metrology.kharkov.ua](mailto:iurii.pavlenko@metrology.kharkov.ua)

### Abstract

The article is devoted to the review of the main results of research and development works performed during the improvement of the state primary measurement standard of the frequency deviation unit. The article analyzes the situation in the field of measuring the parameters of frequency-modulated oscillations in Ukraine that led to the need for improving the unit of frequency deviation created in 1996, namely the need to significantly enhance metrological characteristics and expand the functionality of the measurement standard.

The principle of building a modern measurement standard with advanced functionality, improved metrological characteristics was developed. Solutions used the modern hardware level for measuring parameters of oscillations with frequency modulation and expanding modulating frequencies and deviations.

In the measurement standard, the role of the reference receiver is performed by the spectrum analyzer, which implements the method of measuring the deviation of the Bessel function “zeros” (NFB). The second method used in the measurement standard is a digital method known as the “electronic counting frequency meter” (ELC) method. One of the comprehensive decisions was the use of digital signal generators, which are based on DDS technology (direct digital synthesis) and its subsequent version – Trueform. The article presents the results of analysis of metrological capabilities of these generators in the FM mode, original methods of their research and new results obtained.

During the improvement, the method of receiving the FM signal, based on the use of a spectrum analyzer and an option, analog-digital demodulator, was used and investigated. Automation of control and computational operations on the measurement standard on the basis of the Labview program was carried out.

As a result, a reference complex was created, which according to its metrological characteristics and functional capabilities is able to calibrate not only the devices in the FM mode, but also a wide range of radio measuring instruments of both receiving and generating types.

**Keywords:** frequency modulation; frequency deviation; digital signal generators; measurement standard; uncertainty.

### Список літератури

1. Картьяну Г. Частотная модуляция. Пер. с румынского. 2-е изд. Бухарест: Меридиане, 1964. 672 с.
2. Зенькович А.В. Искажения частотно-модулированных колебаний. Москва: Советское радио, 1974. 296 с.
3. ДЕТУ 09-03-96. Технічний опис. 2019. 70 с.
4. Keysight Technologies. Руководство по выбору генераторов сигналов Keysight. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-03356/technical-overviews/5990-9956.pdf>
5. Ридико Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты. *Компоненты и технологии*. 2001. № 7. URL: [https://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2001\\_07\\_50.pdf](https://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2001_07_50.pdf)
6. Технология генерации сигналов Trueform. URL: <https://www.astena.ru/trueform.html>
7. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. Москва: Госэнергоиздат, 1956. 151 с.
8. Павленко Ю.Ф., Шпаньон П.А. Измерение параметров частотно-модулированных колебаний. Москва: Радио и связь, 1986. 208 с.
9. Метрологическое обеспечение измерителей модуляции: учеб.-метод. пособ. Под ред. В.И. Попова и Ю.Ф. Павленко. Москва: Военное издательство, 1992. 192 с.
10. Міжнародний словник з метрології – Основні й загальні поняття та пов’язані з ним терміни (VIM). Видання 3-тє: переклад ННЦ “Інститут метрології”. 2008. 69 с.
11. R&S@FSWP-K7 Analog Modulation Analysis User Manual, 193 p. URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/pdm/cl\\_manuals/user\\_manual/1177\\_5691\\_01/FSWP\\_K7\\_AnalogModulationAnalysis\\_UserManual\\_en\\_08.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_manuals/user_manual/1177_5691_01/FSWP_K7_AnalogModulationAnalysis_UserManual_en_08.pdf)
12. Огар В.І., Рагог Р.М. Автоматизація еталона ДЧ. *Метрологія та вимірювальна техніка: тези доп. XI Міжнар. наук.-техн. конф.* Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2018. С. 36.
13. Зенькович А.В., Балло В.Л., Добровольский В.Б. Измерение нелинейных искажений частотно-модулированных сигналов прямого цифрового синтеза. *Измерительная техника*. 2018. № 4. С. 43–48. doi: 10.32446/0368-1025it.2018-4-43-48

### References

1. Cartyanu G. Chastotnaya modulyatsiya [Frequency modulation]. 2<sup>nd</sup> ed. Bucharest, Meridiane Publ., 1964. 672 p. (in Russian).
2. Zenkovich A.V. Iskazheniya chastotno-modulirovannykh kolebaniy [Distortion of frequency-modulated oscillations]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1974. 296 p. (in Russian).
3. DETU 09-03-96. Tekhnichnyi opys [Technical description]. 2019. 70 p. (in Ukrainian).
4. Keysight Technologies. Rukovodstvo po vyboru generatorov signalov Keysight [Keysight Signal Generator Selection Guide] (in Russian). Available at: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-03356/technical-overviews/5990-9956.pdf>
5. Ridiko L. DDS: pryamoy tsifrovoy sintez chastoty [DDS: direct digital frequency synthesis]. *Components and Technologies*, 2001, no. 7 (in Russian). Available at: [https://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2001\\_07\\_50.pdf](https://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2001_07_50.pdf)
6. Tekhnologiya generatsii signalov Trueform [Trueform signal generation technology] (in Russian). Available at: <https://www.astena.ru/trueform.html>
7. Kotelnikov V.A. Teoriya potentsialnoy pomехoustoychivosti [The theory of potential noise]



- immunity]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1956. 151 p. (in Russian).
8. Pavlenko Yu.F., Spanion P.A. Izmerenie parametrov chastotno-modulirovannykh kolebaniy [Measurement of parameters of frequency-modulated oscillations]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1986. 208 p. (in Russian).
  9. Popov V., Pavlenko Yu. (Eds.). Metrologicheskoe obespechenie izmeriteley modulyatsii [Metrological support of modulation meters]. Moscow, Voennoye Izdatelstvo, 1992. 192 p. (in Russian).
  10. Mizhnarodnyi slovnyk z metrolohii – Osnovni y zahalni poniattia ta poviazani z nym terminy (VIM) vydannia 3-tie [International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3<sup>rd</sup> edition)]. NSC “Institute of Metrology”. 2008. 69 p. (in Ukrainian).
  11. R&S®FSWP-K7 Analog Modulation Analysis User Manual, 193 p. Available at: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/pdm/cl\\_manuals/user\\_manual/1177\\_5691\\_01/FSWP\\_K7\\_AnalogModulationAnalysis\\_UserManual\\_en\\_08.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_manuals/user_manual/1177_5691_01/FSWP_K7_AnalogModulationAnalysis_UserManual_en_08.pdf)
  12. Ogar V.I., Rarog R.M. Avtomatyzatsiia etalona DCh [Automation of the MS standard]. *Metrology and Measurement Techniques: Proceedings of XI International Scientific and Technical Conference*. Kharkiv, 2018, p.36 (in Ukrainian).
  13. Zenkovich A.V., Ballo V.L., Dobrovolsky V.B. Izmerenie nelineynykh iskazheniy chastotno-modulirovannykh signalov pryamogo tsifrovogo sinteza [Nonlinear distortion measurement of FM DDS signals]. *Measurement Techniques*, 2018, no. 4, pp. 43–48 (in Russian). doi: 10.32446/0368-1025it.2018-4-43-48