



## Цифровому приладобудуванню — нову метрологію

П.І. Неєжмаков<sup>1</sup>, О.М. Васильєва<sup>1</sup>, Ю.Ф. Павленко<sup>1,2</sup>, В.І. Огар<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мירוносицька, 42, 61002, Харків, Україна  
koropetc@ukr.net

<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, просп. Науки, 14, 61166, Харків, Україна

### Анотація

У статті показано, що основними тенденціями розвитку приладобудування в галузі електрорадіовимірювань є не тільки підвищення метрологічних характеристик, але й розширення універсальності та функціональних можливостей цих приладів, що досягається широким використанням цифрових і програмних рішень. Це вимагає нових підходів і до їх метрологічного забезпечення.

На досвіді розробки первинного еталона дев'яти частоти частотно-модульованих (ЧМ) коливань, а також дослідження еталона амплітудно-модульованих (АМ) коливань показано можливість і ефективність використання цифрових методів для формування прецизійних складних широкосмугових сигналів, а також використання програмних методів реалізації складних вимірювальних алгоритмів. Завдяки програмуванню в еталоні ЧМ коливань реалізовано такі методи, як "нулів функції Бесселя" і "комбінаційних частот", які в аналоговому виконанні дуже громіздкі та складні в експлуатації. Описано експериментальні методи оцінки метрологічних характеристик найбільш важливих пристроїв апаратури (генераторів і демодуляторів) при їх реалізації аналоговими та цифровими методами, наведено результати порівняльних вимірювань. Показано, що окрім підвищення метрологічних можливостей цифрові та програмні підходи дозволяють створювати гнучкі багатофункціональні калібраційні комплекси в галузі радіовимірювань.

**Ключові слова:** приладобудування; дигіталізація; цифровий генератор; модульовані коливання; програмні методи; калібраційний комплекс.

Отримано: 16.08.2023

Відредаговано: 07.09.2023

Схвалено до друку: 14.09.2023

### Вступ

В останні десятиріччя відбулися суттєві зміни у світовому приладобудуванні, які прийшли і в Україну. Тенденцією розвитку радіовимірювальної техніки загального призначення у XXI столітті стало створення універсальних багатофункційних ЗВТ із великим набором метрологічних, сервісних і обчислювальних функцій та гнучкою структурою. Замість більш ніж 20 видів радіовимірювальних приладів, які існували за ГОСТ 15094, сьогодні превалюють універсальні прилади двох видів: приймального і генеруючого. Так, сучасний аналізатор сигналів, наприклад фірми "Роде і Шварц", поєднує в собі функції осцилографа, аналізатора спектра, вимірювача частоти, напруги, потужності, параметрів усіх видів модуляції (включаючи цифрову) тощо. Аналогічне можна сказати і про прилади генеруючого виду — вимірювальні генератори. Це досягається за рахунок широкого використання, поруч із традиційною аналоговою технікою, цифрових технологій, про-грамних рішень і комп'ютеризації, вбудова-

них калібраторів, різноманітних опцій, сенсорів тощо.

Розроблені методи цифрової обробки сигналів дозволяють достатньо просто реалізовувати такі алгоритми обробки, які реалізуються дуже складно за допомогою аналогових пристроїв.

У сучасних приладах більшість операцій з обробки сигналів сконцентровано в цифровій частині пристрою (процесорі цифрової обробки сигналу Digital Signal Processor — DSP) і реалізуються програмно. Завдяки цьому досягається значно більша функціональність цифрових систем у порівнянні з аналоговими, оскільки зміна функцій стандарту зв'язку, виду модуляції, оновлення алгоритмів обробки відбувається за допомогою простого перезавантаження програми або її доповнення.

Наразі фактично створено нову філософію і технологію зв'язку та приладобудування, які потребують **нової метрології**.

В Україні, яка має ряд первинних еталонів у галузі вимірювання параметрів радіосигналів,

сьогодні спостерігається масове розповсюдження засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) розробки провідних фірм Європи та США з названими особливостями. На метрологічне обслуговування (перевірку, ремонт, калібрування) також надходить дедалі більше таких високотехнологічних багатофункційних приладів, і їх відносна кількість буде надалі зростати. У зв'язку з цим потрібна адаптація вітчизняної інфраструктури метрологічного забезпечення і перегляд принципів та підходів до побудови еталонів і самої системи метрологічного забезпечення [1, 2].

Суть нового підходу полягає в максимальному використанні як нашого методологічного досвіду з метрології, так і схемно-технологічних рішень сучасного приладобудування, а саме цифрових і програмних рішень. У роботі [1] надано інформацію про створення нового первинного еталона одиниці дев'яти частоти (ДЧ), в якому реалізовані ці нові принципи. Нагадаємо їх коротко.

### Цифровізація апаратури

Одним із кардинальних удосконалень еталона стала заміна аналогових ЧМ-генераторів, які використовувались у попередній версії еталона (ДЕТУ 09-03-95), на цифрові [3, 4]. В основі цифрових методів синтезу сигналів лежить теорема відліків Віттекера – Найквіста – Котельникова, яка стверджує, що для того, щоб відновити сигнал за його відліками без втрат, необхідно, щоб частота дискретизації була хоча б удвічі більшою за максимальну частоту спектра первинного неперервного сигналу [2, 3]. Цифрові методи є основними сучасними методами формування сигналів і мають незаперечні переваги, саме з точки зору якості сигналу (висока чистота спектра і нехтовно малі спотворення), що є головною вимогою до еталона. Аналогове формування ЧМ і АМ сигналів, зважаючи на свою природу, супроводжується рядом паразитних явищ: нелінійними спотвореннями

закону модуляції (через неідеальну лінійність модуляційної характеристики), супутньою АМ при ЧМ і ЧМ при АМ (через параметричні явища), фазовими (частотними) шумами і пов'язаними з цими явищами похибками (невизначеностями) вимірювання інформативних параметрів модуляції.

В останні роки, завдяки прогресу в цифрових технологіях і мікроелектроніці, досягнуто значних успіхів у створенні генераторів на принципі прямого цифрового синтезу (ПЦС) або, в англійській аббревіатурі, Direct Digital Synthesis (DDS) [3, 5, 6].

Структурну схему такого генератора наведено на рис. 1, а принцип його дії розглянуто в [2, 3]. Як показали наші дослідження, ці генератори можуть бути використані як еталонні джерела сигналів.

Подальшим розвитком DDS-технології генераторів стала Trueform-технологія, яка здатна забезпечити ще вищі якісні показники сигналу. Однією з ключових переваг технології Trueform у порівнянні з DDS є краща цілісність сигналу. Trueform відтворює кожен точку сигналу, незалежно від встановленої частоти сигналу або частоти дискретизації. Це дозволяє мінімізувати можливі лінійні та нелінійні спотворення (викривлення) складних широкопasmових сигналів, якими є частотно- і фазомодульовані сигнали [7, 8].

У літературі давно піднімається питання про необхідність перегляду підходу до метрологічного забезпечення сучасних ЗВТ, які являють собою сукупність аналогових і цифрових пристроїв [1].

Існує точка зору, що підхід до аналізу метрологічних характеристик аналогової та цифрової частин ЗВТ повинен бути різним: метрологічним і технологічним (цифровим). При цьому під метрологічним розуміється класичний підхід з оцінкою невизначеностей і т.д., а цифровий підхід – суттєво інший. Достовірність передавання інформації в цифрових системах характеризується статистичною величиною – ймовірністю помилки на біт (BER – Bit Error Rate).

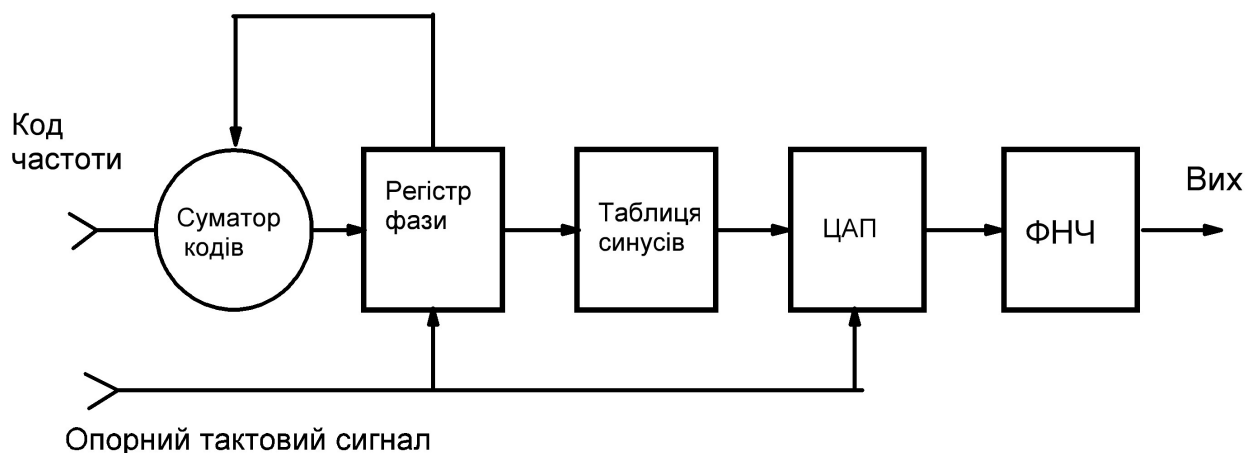


Рис. 1. Структурна схема DDS-генератора

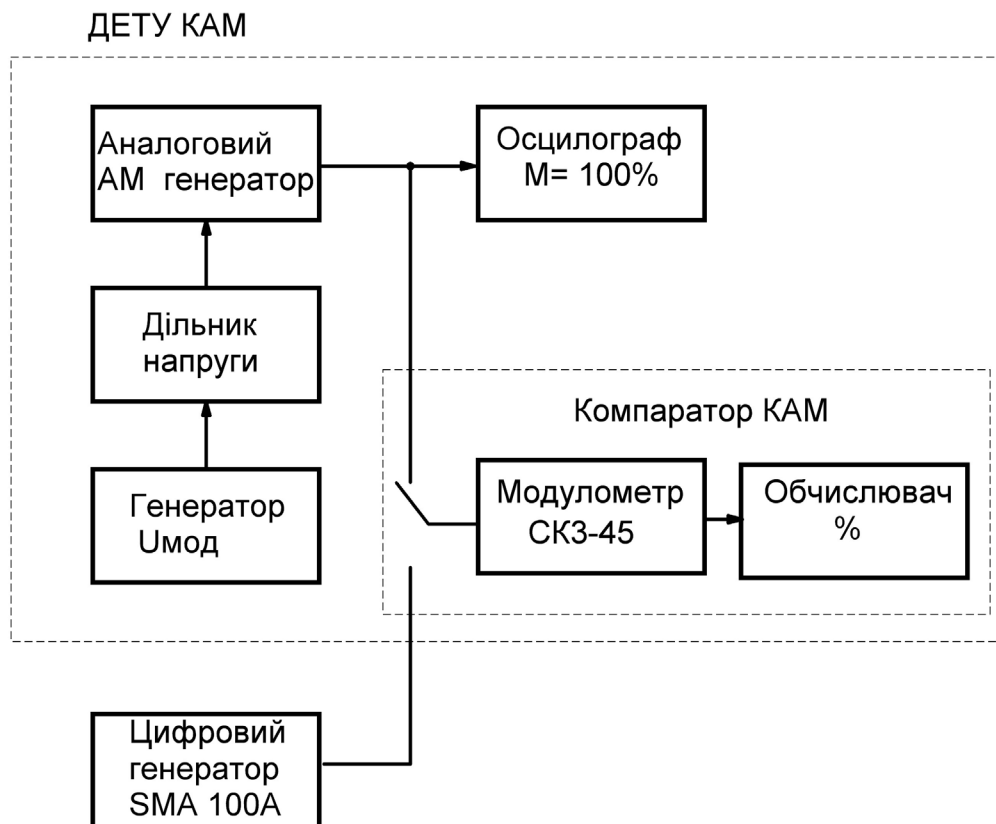


Рис. 2. Компарування аналогового та цифрового АМ сигналів

BER є ймовірністю помилкового приймання при передаванні одного біта інформації, усередненого для статистично великого обсягу інформації. Теоретично величиною, що характеризує ефективність цифрової системи, є пропускна здатність [біт/с], яка характеризує кількість інформації, котру може бути передано в системі зв'язку за одиницю часу (зі 100% достовірністю).

Верхня границя пропускної здатності в системі при заданому відношенні сигнал/шум і доступній смузі передачі встановлюється теоремою Шеннона – Гартлі [9]:

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right),$$

де  $C$  – ємність каналу, біт/с;

$B$  – смуга пропускання каналу, Гц;

$S$  – повна потужність сигналу, Вт<sup>2</sup>;

$N$  – повна шумова потужність, Вт;

$S/N$  – відношення потужностей сигналу і гаусівського шуму (динамічний діапазон).

У практичних цифрових системах достатньо просто досягається значення BER менше  $10^{-6}$ , тобто такою похибкою можна знехтувати.

Повернемось до оцінки метрологічних властивостей цифрового генератора. Важко однозначно сказати, яка його частина є “метрологічною”, а яка чисто “технологічною”, тобто цифровою. Можна, звичайно, вважати весь генератор чисто цифровим пристроєм, а його похибку (спотворення сигналу) – нехтовно малою, але метрологія

вимагає експериментального підтвердження. Тому було запроваджено такий експеримент: провести вимірювання найбільш важливого параметра спотворень – коефіцієнта гармонік, сформованого цифровим методом ЧМ-сигналу – кількома методами і для багатьох значень дев'яти частоти.

Цей експеримент було виконано під час роботи над удосконаленням державного еталона (ДЕТУ) одиниці дев'яти частоти (ДЧ) частотно-модульованих (ЧМ) коливань. Були проведені ретельні порівняльні дослідження – ЧМ-генератора і частотного детектора **аналогового і цифрового** видів. Докладно результати цих досліджень викладено в [4]. Вони підтвердили, що цифрові генератори (створені за технологіями DDS і Trueform) мають значно кращі метрологічні можливості за такими визначальними показниками, як лінійність модуляційної та демодуляційної характеристик, чистота спектра, наявність супутніх (паразитних) модуляцій, рівень шумів.

Додамо, що аналогічні дослідження проводилися з цифровим формуванням АМ сигналу, але експеримент було сплановано по-іншому. Порівнювались коефіцієнти АМ, відтворені державним еталоном КАМ ДЕТУ 09-02-96 (з аналоговою АМ) і цифровим генератором фірми “Роде і Шварц” R&S SMA100A [6] за допомогою компаратора АМ сигналів (рис. 2).

Порівняння відбувались при різних значеннях КАМ, несучих  $f$  і модулюючих частот  $F$  (27 точок). Відносна різниця результатів вимірю-

Результати вимірювання КАМ аналоговим і цифровим методами

КАМ, %	f, МГц	F, кГц	$\delta$ , %, відносна
10	1	0,02	0,08
50	10	1	0,06
100	25	200	0,1

вання коефіцієнтів АМ ( $\delta$ ) в жодній точці не перевищила 0,1%. Результати експерименту наведено в табл. 1.

На основі цих експериментів можна зробити висновок: якщо цифровий генератор при формуванні сигналу використовується в межах своїх нормованих характеристик, то спотворення сигналу нехтовно малі. Те ж саме можна сказати про цифрову демодуляцію АМ і ЧМ сигналів: вона вносить нехтовно малі спотворення.

Функціональну схему цифрового програмного демодулятора АМ і ЧМ сигналів наведено на рис. 3 (опція K7 аналізатора спектра R&S FSV) [8].

Експериментально одержана залежність сумарних спотворень (THD) трактів формування на основі генератора Keysight 33611 і демодуляції ЧМ сигналу на опції K7 аналізатора спектра R&S FSV (рис. 4), звідки видно, що коли ці пристрої використовуються в межах їхніх нормованих характеристик (до девіації частоти 8 МГц на модулюючих частотах до 500 кГц), THD нехтовно малі, а при виході за межі спотворення різко зростають.

### Програмна реалізація методів

Другий важливий висновок, який було зроблено при удосконаленні еталона ДЧ, – це **ефективність і доцільність** використання про-

грамно-комп'ютерних технологій для реалізації “незручних” трудомістких методів, які завдяки цьому одержують нове життя (в еталоні ДЧ – метод нулів функції Бесселя, метод комбінаційних частот, метод електронно-лічильного частотоміра та інші) [1]. В попередньому поколінні державних еталонів девіації частоти і коефіцієнта АМ реалізація кожного з цих методів в аналоговій формі займала окремий блок апаратури, при новому підході – додаток до загальної програми керування.

### Комплексування еталонів

Використання нових підходів дозволило отримати в еталоні принципово нові можливості, як функційні, так і метрологічні. Окрім існування кількох окремих державних еталонів у галузі радіовимірювань, які забезпечують найвищий рівень простежуваності до визначальних сталей, доцільно мати комплексний універсальний засіб на рівні **вторинного еталона** для калібрування радіовимірювальної апаратури за всіма параметрами. Такий комплекс було створено на основі оригінальних методів, розроблених в ННЦ “Інститут метрології”, серійних цифрових приладів, програмного забезпечення і ПЕВМ, а також окремих вузлів, що забезпечують роботу комплексу.

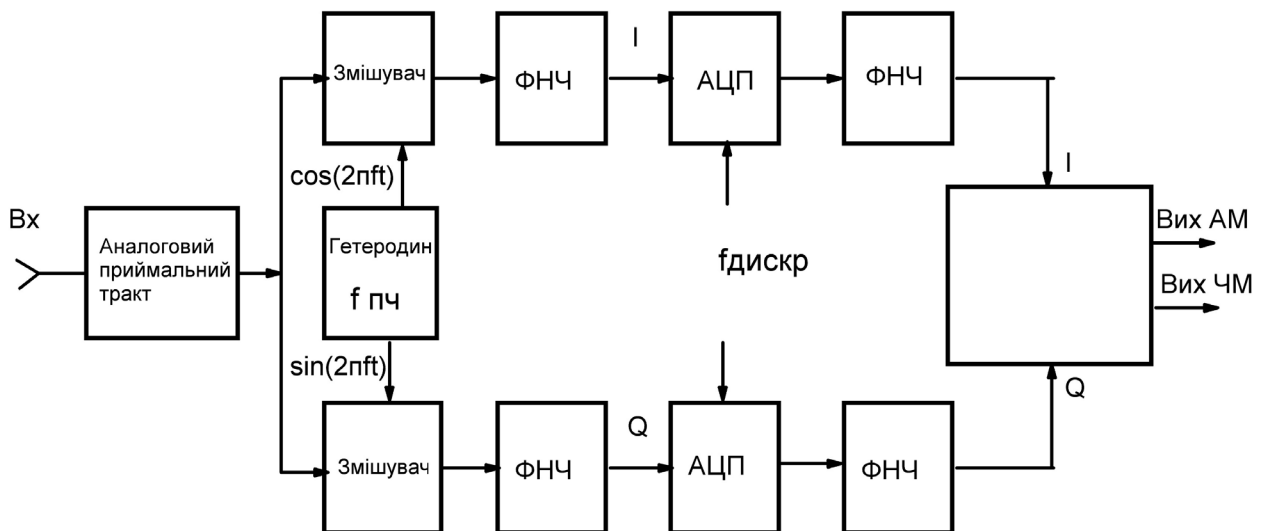


Рис. 3. Цифровий демодулятор АМ та ЧМ сигналів

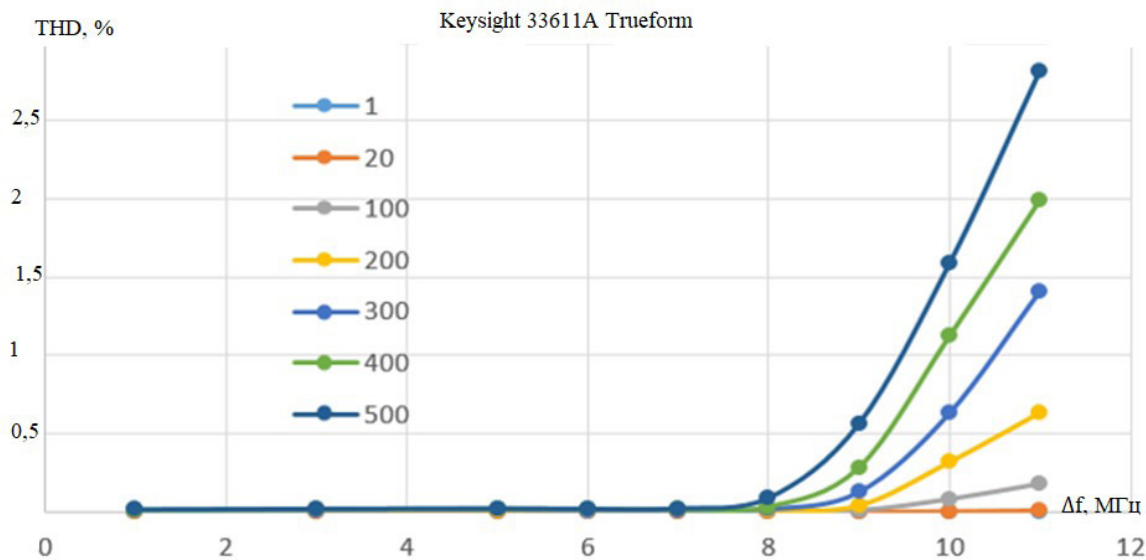


Рис. 4. Спотворення ЧМ сигналу (на виході демодулятора)

Створенню такого багатофункційного калібрувально-повірочного комплексу, опису програми, апаратури і його технічних характеристик буде присвячено окрему статтю.

#### Висновки

1. Характерними рисами сучасних радіовимірювальних приладів є універсальність і великий набір функціональних можливостей, що досягається широким використанням цифрових та програмних рішень. Водночас засоби для їх метрологічного обслуговування, як правило, мають вузькоспеціалізовану спрямованість, що веде до ряду труднощів метрологічного і експлуатаційного характеру. Існував погляд, наприклад, що прецизійні складні, а також високочастотні сигнали, можна формувати лише аналоговими методами, а цифрова техніка призначена, в основному, для робочих приладів. Водночас успіхи сучасної схемотехніки, розробка технології прямого цифрового синтезу

і її подальшої версії Trueform створюють нові можливості цифрового підходу в формуванні, обробці та демодуляції складних сигналів.

2. Проведені в ННЦ “Інститут метрології” розробки й експерименти підтвердили видатні можливості цих технологій і перспективність їх використання в метрологічній і випробувальній апаратурі [10].

3. Було експериментально підтверджено можливість і доцільність реалізації складних вимірювальних алгоритмів програмними рішеннями, зокрема, з їх допомогою реалізовано такі трудомісткі методи, як метод нулів функції Бесселя, комбінаційних частот і ряд інших.

4. Проведені дослідження, а також досвід створення нового державного еталона дозволяють зробити висновок, що нова метрологія в електрорадіовимірюваннях може й повинна розвиватися на принципах дигіталізації, програмування і комплексування.

## Digital instrument construction – “new” metrology

P. Neyezhnikov<sup>1</sup>, O. Vasylieva<sup>2</sup>, Yu. Pavlenko<sup>1,2</sup>, V. Ogar<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Scientific Centre “Institute of Metrology”, Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine  
koropets@ukr.net

<sup>2</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave., 14, 61166, Kharkiv, Ukraine

#### Abstract

As of today, Ukraine maintains a number of primary radio measurement standards established at the end of the last century. However, there is an abundance of high-tech multi-functional measuring equipment being widely spread for the purpose of metrological support (verification, repair, calibration). This circumstance requires the adaptation of the domestic infrastructure of metrological support and revision of the principles and approaches to the metrological support system itself. The essence of the new approach lies in the maximum use of both our methodological experience in metrology and technological solutions of modern instrumentation. When establishing a new primary measurement standard for frequency deviation, these new principles are implemented. The paper shows that the main tendencies in the instrumentation in the field of electro-radio measurements are not only aimed at the improvement of metrological characteristics, but also at the wide use of digital and software solutions, which requires new approaches to metrological support. The experience of developing

the primary measurement standard for frequency deviation of frequency-modulated (FM) oscillations, as well as the study of the measurement standard for amplitude-modulated (AM) oscillations, shows the effectiveness of using digital methods for the generation of precise complex broadband signals, and software methods for the implementation of complex measurement algorithms. Thanks to the programming, such methods as “zeros of the Bessel function” and “combination frequencies” have been implemented, which in the analogue version are very cumbersome and difficult to apply in practice. The experimental estimation of metrological characteristics of the most important equipment devices (generators and demodulators) during their operation by analogue and digital methods is described, and the results of comparative measurements are given. It is shown that, in addition to the increasing number of metrological capabilities, digital and software approaches allow creating flexible multifunctional calibration complexes in the field of radio measurements.

**Keywords:** instrumentation; digitalization; digital generator; modular oscillations; software methods; calibration complex.

### Список літератури

1. Неєжмаков П.І., Павленко Ю.Ф., Огар В.І., Васильєва О.М., Кириєнко С.Р. Новий державний еталон одиниці дев'яти частоти частотно-модульованих коливань. *Український метрологічний журнал*. 2020. № 2. С. 3–11. doi: 10.24027/2306-7039.2.2020.208641
2. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. Госэнергоиздат. 1956. 152 с.
3. Ridiko L. DDS: direct digital frequency synthesis. Available at: <http://www.leoniv.diod.club/articles/pdf/dds.pdf>
4. Павленко Ю.Ф., Кириєнко С.Р., Огар В.І., Васильєва О.М. Дослідження метрологічних можливостей цифрових (DDS- і Trueform-) генераторів. *Український метрологічний журнал*. 2021. № 3. С. 3–9. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2021.241500>
5. Keysight Technologies. Керівництво з вибору генераторів сигналів Keysight. URL: <https://www.keysight.com/us/en/product/N5172B/exg-x-series-rf-vector-signal-generator-9-khz-6-ghz.html>
6. Rohde & Schwarz. Модуляція і формування сигналів за допомогою генераторів сигналів компанії R&S. URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma225/1MA225\\_1rus\\_Modulation\\_Signal\\_Generation.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma225/1MA225_1rus_Modulation_Signal_Generation.pdf)
7. Технологія генерації сигналів Trueform. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/waveform-and-function-generators/trueform-series-waveform-and-function-generators.html>
8. R&S FSWP-K7 Analog Modulation Analysis User Manual. URL: [https://www.rohde-schwarz.com/in/manual/r-s-fswp-k7-analog-modulation-analysis-user-manual-manuals-gb1\\_78701-141976.html](https://www.rohde-schwarz.com/in/manual/r-s-fswp-k7-analog-modulation-analysis-user-manual-manuals-gb1_78701-141976.html)
9. John M. Wozencraft, Irwin Mark Jacobs. Principles of communication engineering. New York, Wiley, 1965.
10. Неєжмаков П.І., Буряковський С.Г., Васильєва О.М., Величко В.А., Веніславський Ф.В., Руденко С.С. Запровадження стандартів НАТО для підвищення електромагнітної стійкості та сумісності обладнання об'єктів критичної інфраструктури. *Український метрологічний журнал*. 2023. № 1. С. 9–21. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2023.282464>
- chastoty chastotno-modulovanykh kolyvan [The new state measurement standard of the unit of frequency deviation of frequency-modulated oscillations]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2020, no. 2, pp. 3–11 (in Ukrainian). doi: 10.24027/2306-7039.2.2020.208641
2. Kotelnikov V.A. The Theory of Potential Noise Immunity. Gosenergoizdat Publ., 1956. 152 p.
3. Ridiko L. DDS: direct digital frequency synthesis. Available at: <http://www.leoniv.diod.club/articles/pdf/dds.pdf>
4. Pavlenko Yu., Kirienko S., Ogar V., Vasileva O. Doslidzhennia metrolohichnykh mozhlyvostei tsyfrovyykh (DDS- i Trueform-) heneratoriiv [Research of metrological capabilities of digital (DDS- and Trueform-) generators]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2021, no. 3, pp. 3–9 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2021.241500>
5. Keysight Technologies. Keysight Signal Generator Selection Guide. Available at: <https://www.keysight.com/us/en/product/N5172B/exg-x-series-rf-vector-signal-generator-9-khz-6-ghz.html>
6. Rohde & Schwarz. Modulation and Signal Generation with R&S Signal Generators. Available at: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma225/1MA225\\_1rus\\_Modulation\\_Signal\\_Generation.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma225/1MA225_1rus_Modulation_Signal_Generation.pdf)
7. Trueform signal generation technology. Available at: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/waveform-and-function-generators/trueform-series-waveform-and-function-generators.html>
8. R&S FSWP-K7 Analog Modulation Analysis User Manual. Available at: [https://www.rohde-schwarz.com/in/manual/r-s-fswp-k7-analog-modulation-analysis-user-manual-manuals-gb1\\_78701-141976.html](https://www.rohde-schwarz.com/in/manual/r-s-fswp-k7-analog-modulation-analysis-user-manual-manuals-gb1_78701-141976.html)
9. John M. Wozencraft, Irwin Mark Jacobs. Principles of communication engineering. New York, Wiley, 1965.
10. Neyezhnikov P., Buriakovskiy S., Vasylieva O., Velychko V., Venislavskiy F., Rudenko S. Zaprovadzhenia standartiv NATO dlia pidvyshchennia elektromahnitnoi stiikosti ta sumisnosti obladnannia obiektiv krytychnoi infrastruktury [Implementation of NATO standards to improve the electromagnetic immunity and compatibility of equipment of the critical infrastructure objects]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2023, no. 1, pp. 9–21 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2023.282464>

### References

1. Neyezhnikov P., Pavlenko Yu., Ogar V., Vasileva O., Kirienko S. Novyi derzhavnyi etalon odyntsi dev'iatykh