



Калібрувальний комплекс радіовимірювальної апаратури

О.М. Васильєва¹, Ю.Ф. Павленко^{1,2}, В.І. Огар^{1,2}

¹ Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Миросицька, 42, 61002, Харків, Україна
kogar@ukr.net

² Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, 61166, Харків, Україна
valeriy.ogar@nure.ua

Анотація

Сучасні тенденції розвитку радіовимірювальної техніки потребують удосконалення принципів метрологічного забезпечення цих приладів і відповідної еталонної бази. В основу нового підходу пропонується покласти цифровізацію апаратури, програмування вимірювальних процедур, перехід від одиночних еталонів до еталонних комплексів.

У статті розглядається комплекс, розроблений в ННЦ "Інститут метрології" й призначений для перевірки та калібрування широкої номенклатури радіовимірювальної апаратури, в якому реалізовано всі ці підходи, наведено методичні, програмні та апаратні особливості його побудови, показано переваги і можливості цього підходу в метрологічній практиці. На прикладі методу "нулів функції Бесселя", який було дещо підзабуто через громіздкість його реалізації аналоговими методом і апаратурою, показано, що при новому підході цей метод одержує "друге народження", до того ж на більш високому метрологічному рівні.

Показано, що використання генераторів прямого цифрового синтезу дозволяє суттєво вдосконалити метод "електронно-лічильного частотоміра", зокрема, запобігти явищу "захоплення частоти", яке обмежувало можливості методу і вносило додаткову невизначеність вимірювання. Також більш докладно пояснено додаткові властивості комплексу, пов'язані з використанням у ньому аналізатора спектра R&S FSL з опцією демодулятора аналогових сигналів K7.

Наводиться перелік інших методів, які реалізуються в комплексі, серед яких заслуговує на особливу увагу метод "комбінаційних частот", що забезпечує найвищу роздільну здатність при вимірюванні нелінійних спотворень як квазігармонійних, так і модульованих сигналів.

Ключові слова: радіовимірювальна апаратура; модульовані радіосигнали; цифрові методи; програмні рішення; комплекс.

Отримано: 23.04.2024

Відредаговано: 20.05.2024

Схвалено до друку: 23.05.2024

Вступ

У попередніх статтях [1, 2] ми подали основні тенденції розвитку сучасного приладобудування, викладені в [3, 4, 5], і позначили напрямки вдосконалення метрологічного забезпечення радіовимірювальної апаратури (РВА). Ці напрямки полягають у більш широкому використанні програмних і цифрових рішень, а також створенні багатофункціональних калібраційних комплексів. Ця робота закінчує серію з трьох статей, присвячених цьому питанню. В ній розглядається створений в ННЦ "Інститут метрології" такий комплекс, призначений для метрологічного обслуговування широкої номенклатури радіовимірювальних приладів (РВП), в тому числі мультифункціональних.

1. Принцип побудови комплексу

Проведені дослідження цифрових генераторів ПЦС і Trueform, а також цифрового ІО-демодулятора, показали, що за своїми метрологічними й функціональними характеристиками вони можуть бути використані не тільки в робочих приладах, але і в еталонній апаратурі й здатні суттєво перевищити можливості аналогової апаратури [1, 2].

Реалізація основних пристроїв еталонів у цифровій формі плюс використання програмних рішень надають додаткові можливості, зокрема дозволяють використовувати складні методики вимірювання і за необхідності доповнювати їх вимірюваннями додаткових параметрів, працювати з цифровою модуляцією, чого раніше не було.

Вибір приладів, що входять до складу еталона



Генератор 5172B Agilent
Діапазон частот: від 9 кГц до 6 ГГц
Смула модуляції сигналу: до 60 МГц
Типи модуляції: АМ, ЧМ, ФМ,
FSK, MSK, PSK, QAM, ASK
Інтерфейси USB, LAN, GPIB



Аналізатор спектра R&S®FSV4. Діапазон 10 Гц–4 ГГц
Смула пропускання 1 Гц до 10 МГц,
Смула огляду 100 Гц...1,5 ГГц
Діапазон амплітуд -100 дБм...+20 дБм,
Абсолютна амплітудна похибка ± 0.4 дБ
Функція демодуляції АМ / FM



Генератор 33611 Keysight True form
Діапазон частот від 1 мкГц до 80 МГц;
Типи сигналів: синусоїдний, АМ,
ЧМ, ФМ Девіація 1 мкГц...40 МГц ($f/2$)
Розмах вихідної напруги 1 мВ...10 В
Коефіцієнт гармонік $\leq 0,03$ %;
Інтерфейс USB.



Аналізатор спектра R&S®FSL6 Діапазон 9 кГц–6 ГГц
Смула пропускання 300 Гц до 10 МГц,
Смула огляду 100 Гц...1,5 ГГц
Функція вимірювання АМ / FM/ФМ модульованих
сигналів. Ширина смуги демодуляції 28 МГц

Рис. 1. Базові прилади комплексу

Новий підхід дозволив створити на основі кількох сучасних цифрових серійних приладів калібрувальний комплекс параметрів радіосигналів, який за своїми метрологічними і функціональними можливостями здатний забезпечити повірку і калібрування багатьох видів РВП. При цьому існуючі державні еталони, що відтворюють окремі одиниці, залишаються засобами вищої точності, які можуть використовуватись для калібрування (атестації) комплексу і референтних вимірювань.

Принцип побудови комплексу і використання програмних рішень дозволяє розширювати його метрологічні, функційні та експлуатаційні можливості шляхом доповнення приладами або програмно.

У комплексі забезпечується простежуваність до визначальних сталих відповідно до Міжнародної системи одиниць SI 2019 р.

2. Структура комплексу

Комплекс побудовано на основі методів і програм, розроблених в ННЦ “Інститут метрології”. Він являє собою набір базових серійних приладів (рис. 1), програмного забезпечення і ПЕВМ, а також допоміжних вузлів.

Комплекс включає до себе таку базову апаратуру:

- аналізатор спектра FSL3 Rohde&Schwarz;
- векторний генератор сигналів Agilent N5172B;
- генератор сигналів Keysight Trueform 33611A;
- аналізатор спектра FSV 4 Rohde&Schwarz.

3. Основні методи вимірювань

У комплексі реалізуються всі методи і можливості, які надають прилади, що входять до його складу. Це забезпечує калібрування за такими загальними параметрами, як частота, напруга, потужність тощо.

Окрім того, додатково програмним шляхом можуть бути реалізовані вимірювання, які потребують використання спеціальних методів:

- еталонне вимірювання девіації частоти (ДЧ) – метод “нулів функції Бесселя” і цифровий метод (відомий як метод “лічильного частотоміра”);
- калібрування коефіцієнта АМ – інтерполяційний метод відносно опорного значення $M=100\%$);
- спектральні методи вимірювання КАМ, ДЧ, КГ;
- вимірювання КГ в режимах НГ, АМ, ЧМ, ФМ із високою роздільною здатністю (метод “комбінаційних частот”);
- компарування АМ, ЧМ і НГ сигналів;
- вимірювання шумових параметрів у різних смугах і режимах.

Апаратура комплексу дає можливість подальшого програмного нарощування методів. Наведемо приклад використання програмної реалізації методу “нулів функції Бесселя” (НФБ).

Цей метод [6] ґрунтується на властивостях спектрального розкладу ЧМ сигналу з гармонічною модуляцією, що, як відомо, має вигляд, показаний на рис. 2.

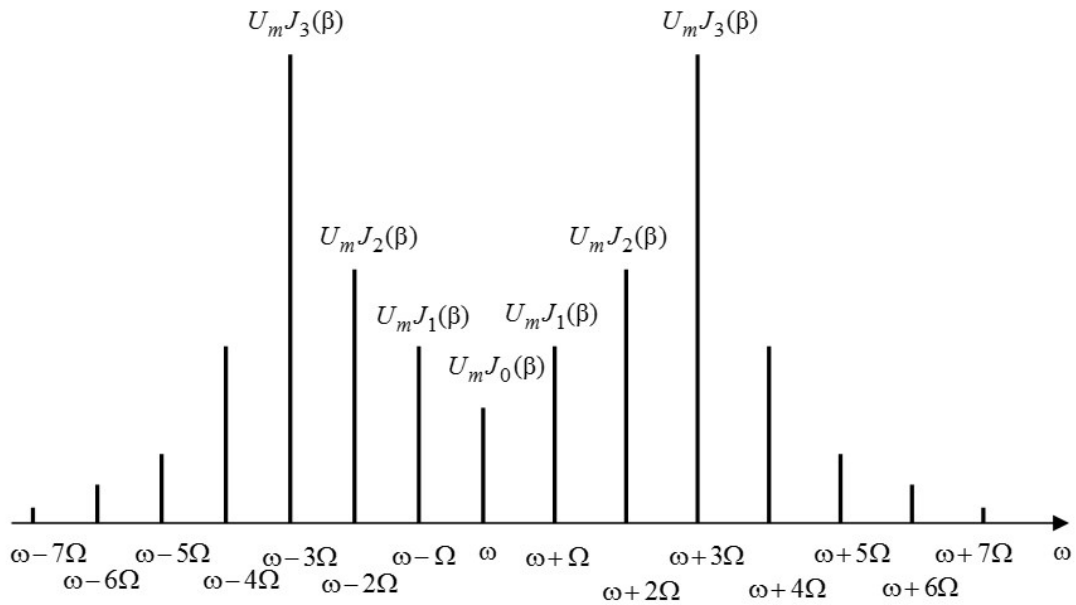


Рис. 2. Спектральний розклад ЧМ сигналу (амплітудний спектр)

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

де $J_{\lambda}(\beta)$ – функція Бесселя першого роду λ -го порядку; β – індекс модуляції.

Амплітуда λ -ї спектральної складової:

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

Функція Бесселя є квазіперіодичною загасаючою функцією (див. рис. 3), корені якої (перетинання з віссю β) табульовані з високою точністю. Таким чином, реєструючи рівність

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

можна встановлювати $\beta = \beta_{0n}$, де β_{0n} – n -й “нуль” λ -ї складової.

Оскільки n і λ нам відомі, β_{0n} знаходиться за таблицями функцій Бесселя [6], а шукана девіація визначається за формулою $\Delta f = \beta_{0n} F$ (модулюючу частоту F може бути виміряно досить точно).

Практично метод реалізується шляхом реєстрації за допомогою спектрального індикатора (наприклад, стандартного аналізатора спектра) обертання в нуль тієї чи іншої складової спектра ЧМ сигналу (рис. 2).

Звичайно для вимірювань використовується складова з несучою частотою ($\lambda=0$), тобто реєструється рівність

$$U_m J_0(\beta) = 0,$$

яка має місце при $\beta_{0n} = 2,4048; 5,5201; 8,6537; 11,7915; 14,9309$; і т.д. [6].

Раніше вважалося, що метод забезпечує високу точність лише при індикації перших

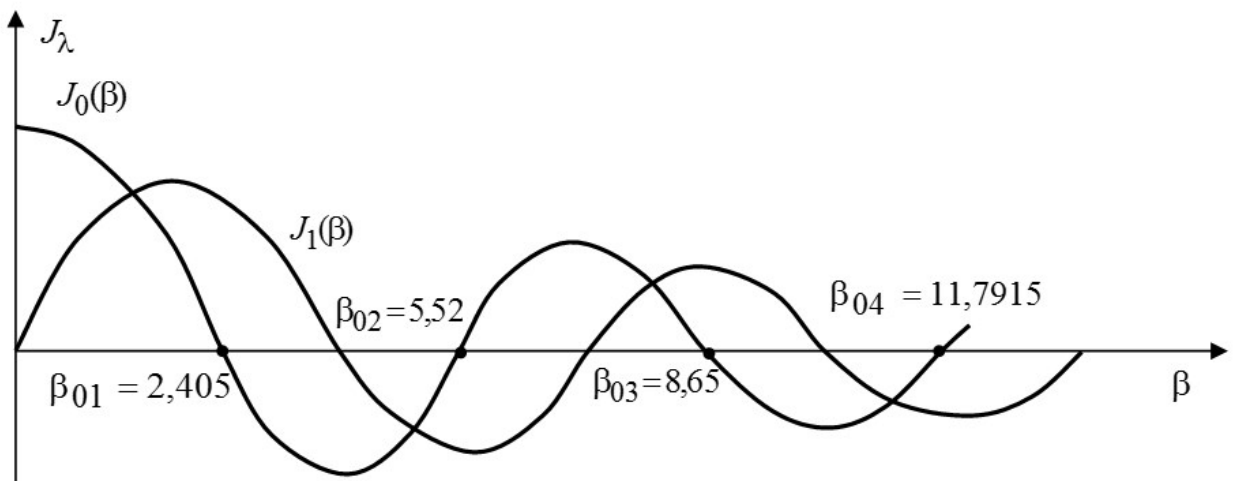


Рис. 3. Функції Бесселя $J_0(\beta)$, $J_1(\beta)$

Значення девіації частоти Δf , які калібруються методом НФБ

Модулююча частота F , кГц	Девіація частоти $\Delta f_n = \beta_{0n} \times F$, кГц				
	$\beta_{01}=2,405$	$\beta_{02}=5,5201$	$\beta_{03}=8,6537$	$\beta_{04}=11,7915$	$\beta_{05}=14,9309$
1	2,405	5,520	8,6537	11,7915	14,9309
5	12,025	27,60	43,27	58,96	74,65
10	24,05	55,201	86,537	117,915	149,3
20	48,10	110,40	173,07	235,83	298,6
50	120,25	276,0	432,7	589,60	746,5
100	240,5	552,0	865,37	1179	1493
150	360,7	828,01	1298,05	1768,7	2239,6
500	1202,5	2760	4327	5896	7465

трьох “нулів Бесселя”, тобто при $\beta_{0i} = 2,4048; 5,5201; 8,653$ (виділені сірим кольором у табл. 1), оскільки при більш високих порядках нулів роздільна здатність значно падає, тобто має місце зростання випадкової похибки (невизначеності за типом А). Але використання, замість аналогових, генераторів прямого цифрового синтезу зі значно меншим рівнем шумів і нестабільності частоти, сучасних аналізаторів спектра, а також програмної реалізації “пошуку” потрібного “нуля” – все це суттєво змінило ситуацію. Стало можливим із високою точністю вимірювати ДЧ при порядку коренів до 5–6-го, а також у більш широкому діапазоні модулюючих частот. Тепер за допомогою цього методу можуть бути відкалібровані значення девіації частоти згідно з табл. 1.

Як видно з цієї таблиці, метод у новому виконанні здатний забезпечити перевірку (калібрування) в діапазонах F до 500 кГц, Δf – до 8 МГц.

Більш того, метод НФБ в автоматичному (програмному) режимі здатний фіксувати обернення в нуль будь-якої спектральної складової, тобто відтворити сітку каліброваних значень ДЧ,

що в ручному режимі є дуже трудомісткою процедурою. Аналогічне можна сказати про інші операції.

У комплексі завдяки новим рішенням суттєво вдосконалено й інші методи, наприклад, метод “електронно-лічильного частотоміра” (ЕЛЧ).

Метод ЕЛЧ відноситься до цифрових методів вимірювань [2]. Сигнал із гармонійною модуляцією з генератора ГЧМС (рис. 4) змішується із сигналом гетеродина з частотою, що відрізняється від носійної частоти ГЧМС на $f_{\text{нч}}$. На виході змішувача виділяється сигнал із низькою різницевою проміжною частотою $f_{\text{нч}} \ll \Delta f$, який подається на ЕЛЧ.

$$u = U_m \sin[2\pi f_{\text{нч}} t + (\Delta f / F) \sin(2\pi Ft)]. \quad (4)$$

За час лічби 1 с ЕЛЧ при $\frac{\Delta f}{F} > \frac{\pi}{2}$ буде накопичено число імпульсів N , що дорівнює середньому значенню частоти

$$N = f_{\text{сеп}} = \frac{\Delta f}{(\pi/2)}. \quad (5)$$

Складова невизначеності типу В, за рахунок дискретності, залежить від співвідношен-

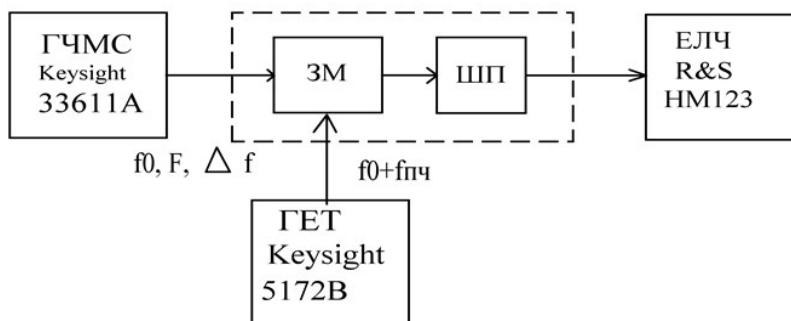


Рис. 4. Структурна схема вимірювання девіації частоти методом ЕЛЧ

ня значення проміжної частоти f_{nc} до девіації:

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\frac{f_{nc}}{\Delta f} \right)^2. \quad (6)$$

Зменшення проміжної частоти нижче 10 кГц у звичайних аналогових генераторах ЧМ сигналу з варікапами в LC контурі приводить до явища “захоплення частоти” і додаткових похибок вимірювання девіації частоти.

У комплексі як джерело ЧМ сигналу використано генератор Trueform Keysight 33611A, а як гетеродин – DDS-генератор Keysight N5172B. Генератори прямого цифрового синтезу (DDS) мають дуже малу нестабільність частоти (10^{-7}), і в них принципово не може виникнути явище захоплення частоти. Це дає можливість отримати значно меншу проміжну частоту (100 Гц) і зменшити складову невизначеності.

Середня частота перетвореного сигналу вимірюється за допомогою електронно-лічильного частотоміра типу Nameg R&S HM 123, який має широкосмуговий високочутливий формувач імпульсів із малим гістерезисом, що також зменшує апаратну похибку вимірювань. Частотомір підключається до комп'ютера через USB порт. Значення девіації частоти визначається шляхом обчислення добутку N на $\pi/2$. Після отримання 10 результатів знаходиться його середнє значення і стандартне відхилення за допомогою програми LabVIEW.

Ще одним методом вимірювання, який використовується в комплексі, є метод демодуляції аналогових АМ і ЧМ сигналів за допомогою аналізатора спектра типу R&S FSL з опцією демодулятора аналогових сигналів K7. Демодуляція ЧМ сигналу в опції K7 аналізатора спектра відбувається шляхом перенесення модульованого сигналу на нульову проміжну частоту, за допомогою квадратурних сигналів гетеродина, одержання квадратурних вибірок ЧМ сигналу I , Q . Після їх аналого-цифрового перетворення в коди відбувається математична обробка 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 Δf_i та сумарний КГ закону модуляції ЧМ сигналу – параметр THD (Total Harmonic Distortion).

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

У комплексі передбачене порівняння результатів вимірювання девіації частоти трьома вказаними методами, що надає йому додаткові функціональні і дослідницькі можливості.

4. Основні технічні характеристики комплексу

При вимірюванні параметрів форми і спектра радіочастотних сигналів комплекс має такі технічні характеристики:

- діапазон несучих частот: неперервно 1–60 МГц, дискретно до 6 ГГц;
- діапазон модулюючих частот 10 Гц – 1 МГц;
- границі вимірювань АМ – до 100%,
ДЧ – до 8 МГц,
КГ – до 100%.

У процесі розробки і дослідження комплексу було експериментально підтверджено можливість перевірки і калібрування таких радіовимірювальних приладів:

- вимірювальних генераторів;
- вимірювачів модуляції, вимірювальних приймачів;
- аналізаторів спектра (сигналів);
- тестерів радіосигналів, сканерів радіосигналів;
- вимірювачів коефіцієнта гармонік;
- вимірювачів потужності.

Повірка і калібрування названих приладів можливі у всіх режимах їхніх технічних можливостей.

Цифрова модуляція

Відмінність калібрування ЗВТ цифрової модуляції, зокрема, сканерів мобільних мереж, від класичних аналізаторів спектра або вимірювальних приймачів НВЧ-діапазону полягає в тому, що перевірити реальну чутливість або динамічний діапазон сканера можливо тільки при підключенні до нього вимірювальних сигналів із необхідними видами модуляції. В ННЦ “Інститут метрології” на цьому комплексі вперше в Україні було проведено калібрування сканера TSME6 для сигналів мобільних технологій GSM, WCDMA, CDMA, LTE, WIMAX тощо. Для формування вимірювальних сигналів було використано генератор Keysight N5172B та ліцензійну програму KeysightSignalStudio. Це дозволило отримати при калібруванні апаратури значення чутливості мінус 120 дБмВт та динамічний діапазон 100 дБ. Використана апаратура входить до складу вказаного калібрувального комплексу.

Аналізатор сигналів спектра типу R&S®FSV4 має опцію FSV-K70, яка дозволяє демодулювати сигнали з цифровою модуляцією QAM і PSK, одночасно вимірює діаграму сузір'я, глазкову діаграму, вектор похибки, декодує сигнали розповсюджених цифрових стандартів зв'язку.

Особливо ефективним виявилось використання вказаного комплексу при повірці та калібруванні



Рис. 5. Приймач R&S®FSMR

таких мультифункціональних приладів, як вимірювальні генератори, аналізатори спектра і сигналів. У цих приладів нормуються і підлягають калібруванню частотні, амплітудні (енергетичні), модуляційні, шумові параметри, а також параметри входу-виходу і спотворень. Наявність такого комплексу дала можливість організувати всю цю роботу на одному робочому місці, яке й було створено в ННЦ “Інститут метрології”, а еталони залишаються як унікальні засоби для особливо точних і референтних вимірювань.

5. Можливість подальшого нарощування функцій

Подальше нарощування функцій комплексу можливе шляхом включення до його складу додаткових приладів. Наприклад, доцільно наділити цей комплекс функцією калібрування за енергетичними параметрами — напругою і потужністю — в більш широких діапазонах. Це досягається комплектацією його, наприклад, вимірювальним приймачем R&S®FSMR (рис. 5).

6. Аналіз простежуваності вимірювань

Відповідно до введеної в дію у 2019 році Міжнародної системи одиниць (SI) державні еталони в галузі електромагнітних вимірювань (ЕМ), що є первинними, простежуються до визначальних сталей, а саме частоти надтонкого квантового переходу в цезії Cs , сталої Планка h , елементарного заряду (електрона e). Схему простежуваності наведено на рис. 6.

Вимірювання частоти і всіх частотних параметрів приладів, що калібруються на комплекси, прямо простежуються до еталона частоти, тобто і до сталої ν (частота квантового переходу в цезії).

Девіація частоти також простежується до цієї сталої, оскільки вона визначається як добуток модулюючої частоти на табульоване значення відповідного кореня функції Бесселя.

Коефіцієнти АМ і КГ, за визначеннями, простежуються до змінної напруги, яка через метод теплового компарування простежується до напруги постійного струму. Остання, в свою чергу, простежується до визначальних сталей ν , e , h через ефект Джоуля.

При вимірюванні потужності ВЧ і НВЧ додається також використання електричного опору, який через метод теплового компарування простежується до визначальних сталей ν , e , h через квантовий ефект Холла.

7. Керуючо-обчислювальна система комплексу

Для керуючо-обчислювальної системи обрано сучасний персональний комп’ютер із конфігурацією: системний блок з ОЗУ 4ГБ/НЖМД 500 ГБ

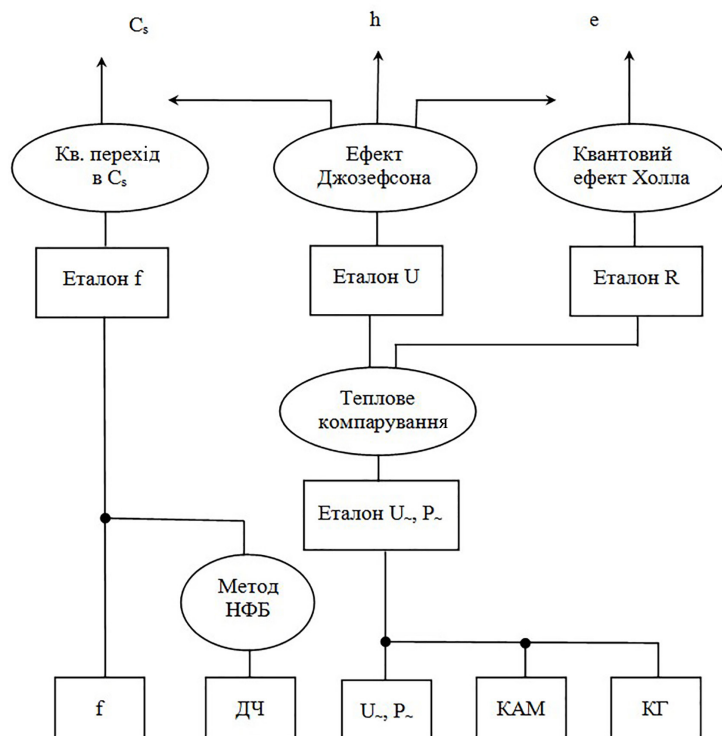


Рис. 6. Схема простежуваності до визначальних сталей



Рис. 7. KUSB-488 фірми Keithley

з частотою двоядерного процесора – 3,7 ГГц із USB портами; DVD +/- RW – драйвер; клавіатура; маніпулятор – миша; програмне забезпечення – Windows 10, монітор рідинно-кристалічний LG E2251.

Прилади, що входять до складу калібрувального комплексу, – генератори Keysight N5172B та 33511A, частотомір R&S HM18576, підключені через інтерфейси до USB роз'ємів комп'ютера через плату розширення USB. Сполучення із вимірювачем модуляції, вольтметром середньоквадратичних значень та іншими приладами виконано через інтерфейс типу “канал загального користування” (КЗК), який відповідає стандарту США IEEE-488 (GPIB). Відповідно до цього стандарту вимірювально-обчислювальна система може становити до 15 приладів, обладнаних інтерфейсами та з'єднаних стандартними кабелями. Для сполучення приладів, обладнаних інтерфейсом IEEE-488 з персональним комп'ютером, обрано інтерфейс типу KUSB-488 фірми Keithley, який вмикається до роз'єму типу USB в персональному комп'ютері та має вихідний роз'єм, що відповідає стандарту IEEE-488 (рис. 7).

Для сполучення оригінальних пристроїв еталона з персональним комп'ютером обрано інтерфейсну схему на мікроконтролерному комплекті Arduino-nano, який керується від USB в персональному комп'ютері.

Як алгоритмічну мову програмного забезпечення, яка працює з сучасними комп'ютерами й операційними системами та має перспективу на найближчі роки, обрано мову високого рівня LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) фірми National Instruments (США). Це графічна мова програмування

з послідовним з'єднанням піктограм елементів у вигляді блок-схеми, що зручніше для розуміння і роботи, яка потім компілюється в машинний код. У ній використовуються конструкції й методи програмування, як і в інших мовах: типи даних, цикли, змінні, рекурсія, обробка подій і об'єктно-орієнтоване програмування. LabVIEW дозволяє автоматично виконувати паралельно команди коду, в той час як традиційні текстові мови (наприклад, C і C++) забезпечують послідовне виконання команд коду. LabVIEW підтримує обладнання різних виробників і має бібліотеки компонентів (VISA-ресурси) для підключення ЗВТ за найбільш розповсюдженими інтерфейсами (RS-232, GPIB-488, USB), для математичної обробки даних, зберігання інформації.

При використанні описаних вище пристроїв для автоматизації калібрування залишаються ручні операції з перемикання режимів роботи, установки несучих і модулюючих частот, значень девіації. Хоча процедуру калібрування може бути представлено у вигляді жорсткого алгоритму, його реалізація ускладнюється відсутністю цифрового керування, а також виходів у цифровому коді в найбільш поширених засобах, що підлягають калібруванню.

Комплекс повністю реалізовано в ННЦ “Інститут метрології”, його дослідження й експлуатація показали, з нашої точки зору, правильність тих напрямків розвитку радіовиміральної апаратури і її метрологічного забезпечення, про які сказано вище.

Висновки

1. Мультифункціональність сучасної радіотехнічної апаратури вимагає її калібрування за багатьма параметрами, що, за необхідності забезпечити простежуваність до первинного еталона за кожним параметром, ускладнює процес калібрування, в той час як існуючі еталони відтворюють одиницю лише за одним параметром. Це дуже ускладнює процес і збільшує час калібрування.

2. Створений в ННЦ “Інститут метрології” калібрувальний комплекс спрощує процес калібрування апаратури й забезпечує простежуваність за кожним параметром одночасно і на одній апаратурі.

3. Розроблене в ННЦ “Інститут метрології” ПЗ керування комплексом дозволяє використовувати найскладніші (при їх апаратній реалізації) методики вимірювання і за необхідності доповнювати їх.

Calibration complex of radio measuring equipment

O. Vasylieva¹, Yu. Pavlenko^{1,2}, V. Ogar^{1,2}

¹ National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
koropetc@ukr.net

² Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave., 14, 61166, Kharkiv, Ukraine
valeriy.ogar@nure.ua

Abstract

Modern trends in the development of radio measuring equipment require improvement of the principles of metrological support of these devices and corresponding reference base. The new approach is based on the digitalisation of equipment, programming of measurement procedures, and the transition from single measurement standards to measurement complexes.

The paper describes the complex developed at the NSC "Institute of Metrology" and designed for verification and calibration of a wide range of radio measuring equipment, where all these approaches are realised, presents methodological, software and hardware features of its construction, as well as the advantages and possibilities of this approach in metrological practice. On the example of the method of "Bessel Function Zeros", which was somewhat forgotten due to the cumbersome nature of its implementation by analogue methods and equipment, it is shown that with the new approach this method gets a "second birth", moreover, at a higher metrological level. It is shown that the use of direct digital synthesis oscillators can significantly improve the "electronic counting frequency meter" method, in particular, prevent the phenomenon of "frequency capture", which limited the capabilities of the method and introduced additional measurement uncertainty. Moreover, the additional properties of the complex associated with the use of the R&S FSL spectrum analyser with the K7 analogue signal demodulator option are explained in more detail. A list of other methods realised in the complex is given, among which the "combination frequencies" method, deserves a special attention, providing the highest resolution in measuring nonlinear distortions of both quasi-harmonic and modulated signals. It is shown that the complex is a flexible apparatus, the work programme of which can be adjusted and supplemented. Information on the structure of the complex, hardware solution of a number of nodes, programming language, etc. is given.

Keywords: radio measuring equipment; modulated radio signals; digital methods; software solutions; complex.

Список літератури

1. Неєжмаков П.І., Васильєва О.М., Павленко Ю.Ф., Огар В.І. Цифровому приладобудуванню – нову метрологію. *Український метрологічний журнал*. 2023. № 3. С. 3–8. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2023.291854>
2. 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>
3. Keysight Technologies. Keysight Signal Generator Selection Guide. URL: <https://www.keysight.com/us/en/product/N5172B/exg-x-series-rf-vector-signal-generator-9-khz-6-ghz.html>
4. Rohde & Schwarz. Modulation and Signal Generation with R&S Signal Generators. URL: https://www.rohde-schwarz.com/ca/applications/modulation-and-signal-generation-with-r-s-signal-generators-educational-note_230850-230082.html
5. Trueform signal generation technology. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/waveform-and-function-generators/trueform-series-waveform-and-function-generators.html>
6. Картьяну Г. Частотная модуляция. 2-е изд. Пер. с румынского. Бухарест: Меридиане, 1964.

References

1. Neyezhnikov P., Vasileva O., Pavlenko Yu., Ogar V. Tsyfrovomu prykladobuduvannyu – novu metrolohiyu [Digital instrument construction – "new" metrology]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2023, no. 3, pp. 3–8 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2023.291854>
2. Pavlenko Yu., Kirienko S., Ogar V., Vasileva O. Doslidzhennia metrolohichnykh mozhlyvostei tsyfrovyykh (DDS- i Trueform-) heneratoriv [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>
3. 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>
4. Rohde & Schwarz. Modulation and Signal Generation with R&S Signal Generators. Available at: https://www.rohde-schwarz.com/ca/applications/modulation-and-signal-generation-with-r-s-signal-generators-educational-note_230850-230082.html
5. Trueform signal generation technology. Available at: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/waveform-and-function-generators/trueform-series-waveform-and-function-generators.html>
6. Kartyanu G. Chastotnaya modulyatsiya [Frequency modulation]. 2nd ed. Transl. from Romanian. Bucharest, 1964.