

КАЛІБРУВАННЯ АНАЛІЗАТОРІВ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Олег Мещеряк, Олег Величко, д.т.н., проф.

Державне підприємство “Укрметртестстандарт”, Україна; e-mail: velychko@hotmail.com

Резюме

Створення та функціонування систем мобільного зв'язку неможливе без визначення параметрів базових станцій та систем мобільного зв'язку. Для цих цілей застосовують відповідні прилади, які оптимально поєднують можливості тестування в єдиному портативному рішенні, що виключає необхідність у кількох окремих контрольно-вимірювальних приладах. Одними із основних видів вимірювань такими приладами є вимірювання потужності сигналів ультрависоких та надвисоких частот. В статті представлено метод калібрування вимірювачів прохідної та поглиненої потужності сигналів ультрависоких та надвисоких частот на прикладі аналізаторів параметрів систем мобільного зв'язку Bird 5000-EX у комплекті з датчиком Power Sensor 5010B та вимірювальними головками, аналізаторів спектру Anritsu CellMaster MT8212EA і Anritsu SiteMaster S331E. Розроблено схеми калібрування аналізаторів параметрів систем мобільного зв'язку та аналізаторів базових станцій мобільного зв'язку (далі – аналізатори). Створено модель вимірювання аналізаторів за параметрами прохідної та поглиненої потужності сигналів ультрависоких та надвисоких частот виходячи з розроблених схем калібрування. Визначено внесок кожної складової моделі вимірювання в результат калібрування та відповідні невизначеності складових моделі. Складено бюджет невизначеності вимірювань виходячи із запропонованої моделі калібрування аналізаторів. Проаналізовано вплив найбільш суттєвих впливних величин на точність результатів вимірювань. Розкрито зміст кількісних та якісних показників поправок, які необхідно враховувати під час калібрування для досягнення найвищої точності вимірювань. Наведено практичні результати досліджень нестабільності вимірювань. Описаний в статті метод калібрування аналізаторів може бути використаним у калібрувальних лабораторіях, які мають відповідне обладнання та еталони.

Ключові слова

Прохідна потужність, поглинута потужність, ультрависока частота, надвисока частота, аналізатор параметрів, калібрування, невизначеність вимірювань, система мобільного зв'язку.

1. Вступ

В Україні та в усьому світі іде неупинний розвиток мобільного зв'язку. Створюються та розвиваються нові технології зв'язку широкопосного доступу, такі як 4G та 5G. Поступово відходять в минуле стаціонарні телефони, та навіть стаціонарний інтернет. Все більше користувачів користується мобільним інтернетом, надаючи перевагу мобільним гаджетам. Для створення та функціонування нових систем мобільного зв'язку відповідними галузевими фахівцями розробляються та впроваджуються нові нормативні документи, наприклад, такі як рекомендації Сектору стандартизації електровз'язку Міжнародного союзу електровз'язку (ITU-T) [1–3], які по суті є докладними інструкціями зі створення таких систем. Смути частот визначені ІТУ, а у системах мобільного зв'язку використовуються дві основні слуги частот ультрависоких (300–3000 МГц) та надвисоких (3–30 ГГц) частот. У технологіях 3G використовуються частоти у діапазоні 400 МГц–2,6 ГГц, 4G – 600 МГц–6 ГГц, 5G – 600 МГц–24 ГГц.

Звичайно, неможливо створити та забезпечити функціонування систем мобільного зв'язку без проведення необхідних вимірювань. Такі вимірювання визначаються широкою автоматизацією, великим різноманіттям, високою точністю та швидким розвитком. Разом із розвитком вимірювань змінюється і асортимент вимірювальних приладів та навіть їх покоління. Також є очевидним, що всі ці прилади повинні бути справними та відхилятися в своїх показах в допустимих межах. Основними величинами, які вимірюють застосовні в сфері мобільного зв'язку прилади є частота, час та пов'язані з ними параметри нестабільності, рівні потужності сигналів ультрависоких та надвисоких частот (УНВЧ), коефіцієнти підсилення (затухання) потужності УНВЧ сигналів, коефіцієнти відбиття потужності УНВЧ тощо. Для контролю параметрів приладів, провайдером мобільного зв'язку, як правило, застосовується для цього найбільш поширена у світі процедура, а саме – калібрування відповідно до вимог [4].

Актуальним питанням є застосування існуючих і розроблення нових процедур калібрування аналізаторів параметрів систем мобільного зв'язку відповідно до вимог [4] за одними з найбільш поширених параметрів у сфері мобільного зв'язку – вимірюваннями потужності сигналів УНВЧ. Як об'єкти калібрування вибрано одні з найбільш поширених в сфері мобільного зв'язку прилади (далі – аналізатори): аналізатори параметрів систем мобільного зв'язку (Bird 5000-EX у комплекті з датчиком Power Sensor 5010B та вимірювальними головками,

виробництва Bird Electronic Corporation, США), аналізатори базових станцій мобільного зв'язку (аналізатори спектру Anritsu CellMaster MT8212EA, Anritsu SiteMaster S331E, виробництва транснаціональної корпорації Anritsu, Японія).

2. Недоліки

Калібрування датчиків потужності УНВЧ не є новим питанням та неодноразово розглядалось в різних редакціях документу EA-04/02, на різних частотах, в останній редакції [5] – на частоті 19 ГГц. Також, як приклад, для розрахунку невизначеності при калібруванні датчиків потужності сигналів УНВЧ можна використовувати [6], де є окремий додаток, присвячений цьому питанню.

Засоби вимірювання потужності УНВЧ використовується для калібрування різноманітних засобів вимірювання у діапазоні частот від 30 МГц до 18 ГГц [7–11]. Відомі типові схеми калібрування сенсорів УНВЧ, зокрема наведені у [9–11]. Для вимірювачів поглиненої та прохідної потужності використовуються метод безпосереднього порівняння та метод порівняння за допомогою компаратора.

В той же час, зазначені вище приклади є лише базовими, присвячені лише калібруванню датчиків поглиненої потужності, з використанням певного специфічного обладнання, та можуть коректуватися в залежності від наявного калібрувального обладнання та особливостей вимірювальних приладів, що калібруються.

У статті розглянуті питання калібрування аналізаторів при вимірюванні прохідної та поглиненої потужності сигналів УНВЧ, які мають відмінності від датчиків поглиненої потужності, наведених в [5], уточнено складові бюджету та власне сам бюджет невизначеності, виходячи із запропонованої в дослідженні схеми калібрування.

3. Мета

Метою дослідження є удосконалення методу калібрування аналізаторів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити схему калібрування аналізаторів;
- створити модель вимірювання виходячи із схеми калібрування;
- визначити внесок кожної складової моделі вимірювання в результат калібрування та невизначеність вимірювань;
- скласти бюджет невизначеності виходячи із запропонованої моделі вимірювання.

4. Схеми калібрування аналізаторів при вимірюванні потужності

Калібрування аналізаторів виконують методом зіставлення показів аналізатора з показами еталонного вимірювача поглиненої потужності УНВЧ. Оскільки аналізатори можуть вимірювати як прохідну так і поглинену потужність, схему калібрування обирають з урахуванням типу аналізатора, що калібрується (рис. 1, 2). Зображене на рисунках пунктиром може використовуватися за необхідності.

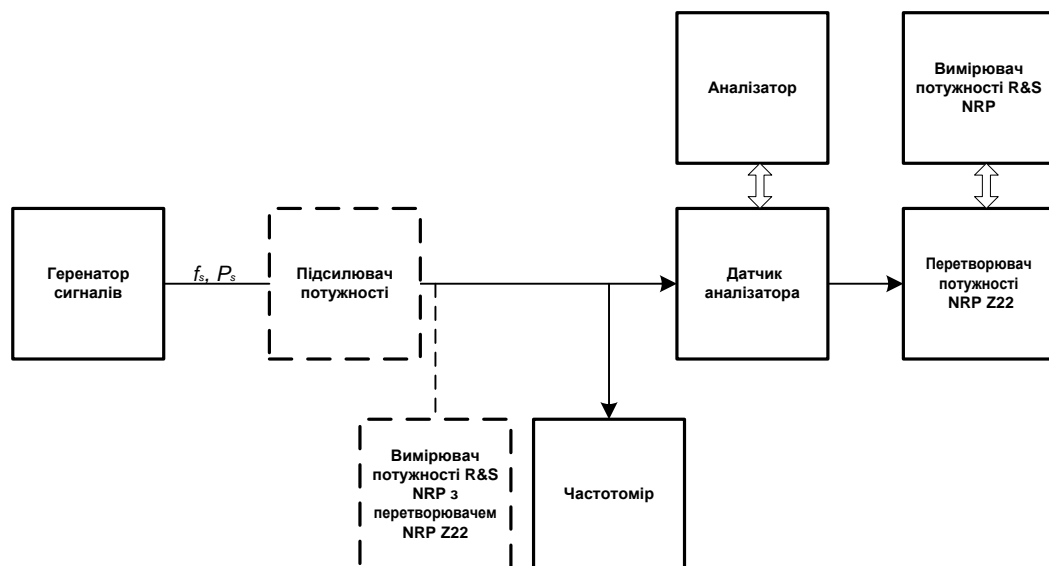


Рис. 1. Схема калібрування аналізаторів при вимірюванні прохідної потужності

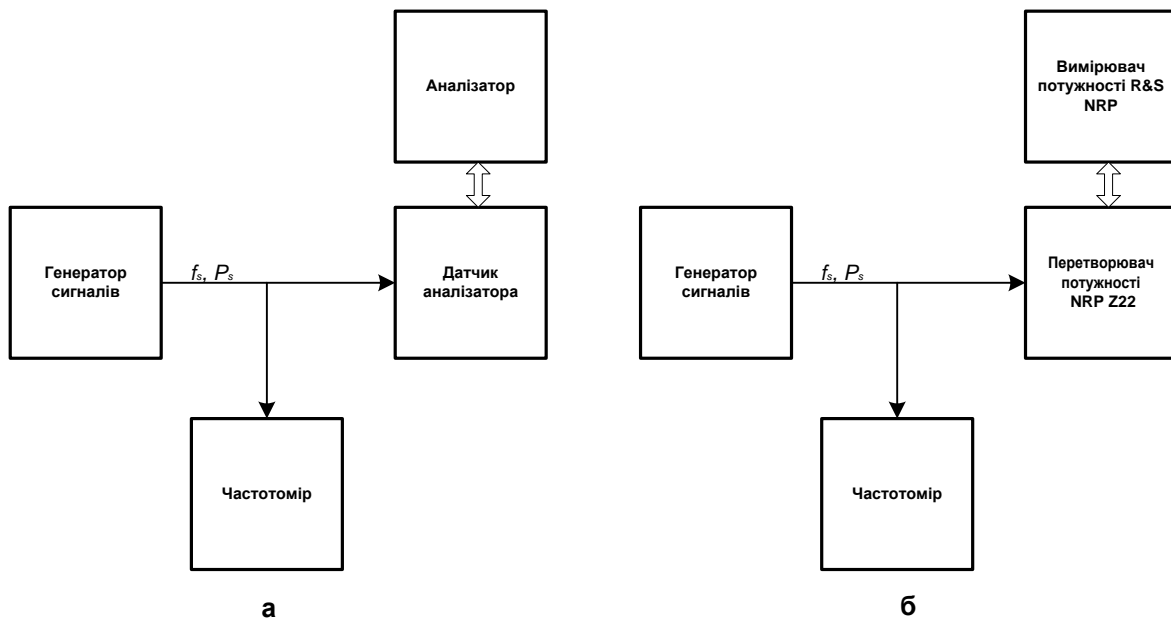


Рис. 2. Схема калібрування аналізаторів при вимірюванні поглиненої потужності
 а – вимірювання поглиненої потужності аналізатором; б – вимірювання поглиненої потужності
 еталонним вимірювачем

Розглянемо метод калібрування аналізаторів при вимірюванні прохідної та поглиненої потужності сигналів УНВЧ на прикладі аналізаторів параметрів систем мобільного зв'язку таких як Bird 5000-EX у комплекті з датчиком Power Sensor 5010B та вимірювальними головками, аналізаторів базових станцій мобільного зв'язку таких як аналізатори спектру Anritsu CellMaster MT8212EA і Anritsu SiteMaster S331E. Як еталонний вимірювач використовується вимірювач потужності УНВЧ R&S NRP з перетворювачем потужності NRP Z22 (далі – R&S NRP), частотний діапазон якого від 10 МГц до 18 ГГц, основна абсолютна похибка вимірювання потужності УНВЧ $\pm 0,1$ дБ.

Як засоби вимірювальної техніки та допоміжне обладнання застосовуються:

генератор сигналів Aaronia BPSG6 OEM (діапазон частот від 23,5 МГц до 6 ГГц, діапазон рівнів вихідного сигналу від мінус 45 дБм до +18 дБм, основна абсолютна похибка ± 1 дБ);

високочастотний підсилювач потужності УЗ-33 (діапазон частот від 0,05 до 400 МГц, коефіцієнт підсилення – до 25 дБ);

частотомір електронно-лічильний CNT-90 (діапазон частот – до 3 ГГц, основна відносна похибка вимірювання частоти 10-8);

цифровий мультиметр Agilent 34410A (основна абсолютна похибка вимірювання частоти і напруги мережі живлення змінного струму $\pm 0,5$ %);

термогігрометр Testo 608-H1 (діапазон вимірювання температури від 0 до 50 °С з межами абсолютної похибки $\pm 0,2$ °С, діапазон вимірювання вологості від 10 до 95 % з межами абсолютної похибки ± 3 %).

Для проведення калібрування можуть застосовуватись та інші робочі еталони або засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), які можуть забезпечити необхідну точність вимірювань.

Операції калібрування аналізаторів виконуються за наступних умов навколишнього середовища: температура – від 15 до 25 °С, відносна вологість – від 30 до 80 %, частота мережі – від 49 Гц до 51 Гц, напруга мережі живлення змінного струму – від 198 до 242 В. На вимогу замовника калібрування може виконуватися за інших умов, що допускаються експлуатаційною документацією на робочі еталони, ЗВТ і аналізатори, що калібруються. При необхідності аналізатор, що підлягає калібруванню може поміщатись в термостатовану камеру.

При підготовці до калібрування перевіряють наявність експлуатаційної документації, забезпечують умови навколишнього середовища у приміщенні, де буде проводитись калібрування. При цьому температура та вологість навколишнього середовища вимірюється за допомогою гігрометра Testo 608-H1. Проводять зовнішній огляд аналізатора, з'єднують блоки та вузли робочих еталонів та засобів вимірювальної техніки відповідно до схеми калібрування та згідно з експлуатаційною документацією, включають їх та прогрівають. Готують аналізатор до роботи відповідно до експлуатаційної документації, при цьому проводять опробування аналізатора за допомогою функції автоматичного тестування та підстроювання його внутрішніх блоків та вузлів. На R&S NRP запускають функцію автоматичного калібрування, після її завершення встановлюють необхідне значення частоти сигналу.

Якщо всі операції підготовки до калібрування виконані успішно, то переходять до виконання операцій калібрування, в іншому випадку калібрування припиняють. При виконання операцій калібрування

встановлюють на аналізаторі та R&S NRP одиниці вимірювання дБм. З генератора високочастотних сигналів Aaronia BPSG6 OEM на датчик аналізатора подають сигнал з частотою 400 МГц та рівнем 10,0 дБм, Значення потужності сигналу, виміряні за допомогою аналізатора та еталонного вимірювача потужності R&S NRP вносять до протоколу калібрування. Проводять такі самі вимірювання потужності сигналу для рівнів 13,5, 15, 18 дБм. Повторюють операції для таких значень частот сигналів: 600, 900, 1700, 1800, 1900, 2100 і 2600 МГц і повторюють вимірювання, за необхідності проводять заміну вимірювальних головок. Калібрування може проводитись і за іншими точками, за необхідності використовують підсилювач потужності, вихідна потужність якого контролюється R&S NRP.

5. Оцінювання невизначеності результатів вимірювань

Після закінчення експериментальних досліджень проводять оцінювання невизначеності результатів вимірювань з урахуванням вимог [2, 5, 12].

Модель вимірювання має такий вигляд:

$$\delta P_x = P_{xs} + \delta P_{ps} + \delta P_{\gamma s} + \delta P_{crs} + \delta P_{\beta cable} + \delta P_{ts} + \delta P_{tx} + \delta P_{ds} + \delta P_{dx}, \quad (1)$$

де:

δP_x – відхилення значення потужності, вимірюваної аналізатором, від дійсного значення;

$P_{xs} = P_x - P_s$ – різниця між показами в дБ;

P_x – покази вимірюючого аналізатором значення потужності сигналу в дБм;

P_s – покази вимірюючого R&S NRP значення потужності сигналу в дБм;

δP_{ps} – поправка на відхилення показів R&S NRP (із сертифіката калібрування);

$\delta P_{\gamma s}$ – поправка на дрейф R&S NRP з моменту його останнього калібрування (із паспорта на R&S NRP і може уточнюватись за наявності статистичних даних);

δP_{crs} – поправка на потужність, що відбивається R&S NRP (із сертифіката калібрування);

$\delta P_{\beta cable}$ – поправка на згасання в кабелі, що подає сигнал від генератора сигналів до датчика аналізатора (із сертифіката калібрування);

δP_{ts} – поправка на температурну залежність R&S NRP (з паспорта еталона);

δP_{tx} – поправка на температурну залежність аналізатор (із паспорта аналізатора);

δP_{ds} – поправка на дискретність показів індикатора R&S NRP (з паспорта еталона);

δP_{dx} – поправка на дискретність показів індикатора аналізатора (з паспорта аналізатора).

Виходячи із моделі вимірювання, бюджет невизначеності для аналізатора параметрів систем мобільного зв'язку Bird 5000-EX представлений у табл. 1.

Таблиця 1. Бюджет невизначеності вимірювань аналізатора Bird 5000-EX на частоті 400 МГц

Величина x_i , дБ	Оцінка вхідної величини x_i , дБ	Стандартна невизначеність, $u(x_i)$, дБ	Розподіл	Дільник	Коефіцієнт чутливості, c_i	Внесок у невизначеність, $u_i(y)$, дБ
P_{xs}	1,144	0,128	нормальний	1	1,0	0,128
δP_{ps}	0,010	0,062	нормальний	1	1,0	0,062
$\delta P_{\gamma s}$	0	0,030	рівномірний	$\sqrt{3}$	1,0	0,017
δP_{crs}	0	0,010	U-подібний	$\sqrt{2}$	1,0	0,007
$\delta P_{\beta cable}$	-0,009	0,012	рівномірний	$\sqrt{3}$	1,0	0,007
δP_{ts}	0	0,081	рівномірний	$\sqrt{3}$	1,0	0,047
δP_{tx}	0	0	рівномірний	$\sqrt{3}$	1,0	0,000
δP_{ds}	0	0,005	рівномірний	$\sqrt{3}$	1,0	0,003
δP_{dx}	0	0,005	рівномірний	$\sqrt{3}$	1,0	0,003
δP_x	1,145					0,151

Стандартна невизначеність типу А різниці між показами аналізатора та R&S NRP при кількості вимірювань, які проводяться при калібруванні аналізатора, що дорівнює $n = 5$, визначається за формулою:

$$u_A(P_{xs}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (P_{xsi} - \overline{P_{xs}})^2}, \quad (2)$$

де $\overline{P_{xs}}$ – середнє арифметичне значень різниць між показами аналізатора та R&S NRP.
Стандартні невизначеності $u(x_i)$ типу В такі:

$u(\delta P_s)$ – стандартна невизначеність R&S NRP із сертифіката калібрування);

$u(\delta P_{ys})$ – стандартна невизначеність поправки на дрейф R&S NRP (із паспорта на R&S NRP і може уточнюватись за наявності статистичних даних);

$u(\delta P_{crs})$ – стандартна невизначеність потужності, що відбивається R&S NRP (із сертифіката калібрування);

$u(\delta P_{\beta cable})$ – стандартна невизначеність поправки на згасання в кабелі (із сертифіката калібрування);

$u(\delta P_{ts})$ – стандартна невизначеність поправки на температурну залежність R&S NRP (із паспорта еталона);

$u(\delta P_{ts})$ – стандартна невизначеність поправки на температурну залежність аналізатора (із паспорта аналізатора);

$u(\delta P_{ds})$ – стандартна невизначеність поправки на дискретність показів R&S NRP (із паспорта еталона);

$u(\delta P_{ds})$ – стандартна невизначеність поправки на дискретність показів аналізатора (із паспорта аналізатора).

Сумарна стандартна невизначеність $u_c(\delta P_x)$ визначається за формулою:

$$u_c(\delta P_x) = \sqrt{u_A^2 + \sum_{i=1}^m u_i(y)^2}, \quad (3)$$

де m – загальна кількість складових $u_i(y)$ типу В.

Розширену невизначеність розраховують за формулою:

$$U = k \cdot u_c(\delta P_x), \quad (4)$$

де:

$u_c(\delta P_x)$ – значення стандартної невизначеності вимірювання потужності сигналу;

k – коефіцієнт охоплення, $k = 2$.

За наведеними у табл. 1 даними розширена невизначеність U складає 0,3 дБ.

Результати калібрування аналізаторів оформлюють сертифікатом калібрування відповідно до вимог [4].

7. Висновки

Запропонована модель вимірювань та бюджет невизначеності вимірювань передбачає отримання результатів у відносних одиницях – дБ. Визначено внесок кожної складової моделі вимірювань в результат калібрування та невизначеність вимірювань. В подальшому доцільно провести дослідження з калібрування аналізаторів за вимірюванням відбитої потужності сигналів УНВЧ. Описаний в статті метод калібрування аналізаторів може бути використаним у калібрувальних лабораторіях, які мають відповідне обладнання та еталони.

Посилання

- [1] Recommendation ITU-T G.811 (1997), Timing characteristics of primary reference clocks [Electronic resource]. – Available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.811-199709-I/en>.
- [2] Recommendation ITU-T G.811.1 (2017), Timing characteristics of enhanced primary reference clocks [Electronic resource]. – Available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.811.1-201708-I/en>.
- [3] Recommendation ITU-T G.812 (2004), Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks [Electronic resource]. – Available at: <https://www.itu.int/rec/T-RECG.812-200406-I/en>.
- [4] EN ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- [5] EA-04/02 M. Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. EA, 2021, 78p.
- [6] M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. Edition 4 October 2019, 81 p.
- [7] Zhang Z., Liao X. A Microwave Power Sensor. In: Huang QA. (eds) Micro Electro Mechanical Systems. Micro/Nano Technologies. Springer, Singapore, 2018.
- [8] X. Cui, Y. S. Meng, Y. Shan and Y. Li. Microwave Power Measurements: Standards and Transfer Techniques. New Trends and Developments in Metrology, Luigi Cocco (Ed.), IntechOpen, 2016, pp. 3–20.
- [9] Y. Shan and X. Cui. RF and Microwave Power Sensor Calibration by Direct Comparison Transfer. Modern Metrology Concerns, Luigi Cocco (Ed.). IntechOpen, 2012, pp. 175–200. DOI: 10.5772/34553.
- [10] Y. S. Meng, Y. Shan. Measurement and Calibration of A High-Sensitivity Microwave Power Sensor with An Attenuator. Radioengineering, vol. 23, no. 4, 2014, pp. 1055–1060.
- [11] Calibration of power sensors for low-power measurement: Best practice guide. M. Rodriguez, M. Celep, M. Hudlicka, et. al. EMPIR 15RPT01, RFMicrowave, 2019, 18 p.

[12] Velychko O., Gordiyenko T. Metrological Traceability at Different Measurement Levels. Standards, Methods and Solutions of Metrology, Published by IntechOpen, London, United Kingdom, 2019; Chapter 1, pp. 1–21. DOI: 10.5772/intechopen.84853.