

ОСОБЛИВОСТІ ПРЕЦИЗІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ПРОМИСЛОВІЙ ЧАСТОТІ

Олег Величко, д.т.н., проф.

Державне підприємство “Укрметртестстандарт”, Україна;

e-mail: velychko@hotmail.com

Александру Салсеану, д.т.н., проф.

Технічний університет Яс імені Георге Асакі, Румунія, e-mail: salceanualexandru@yahoo.com

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2025.01>

Анотація

Вимірювання електричної енергії має велике значення в різних сферах, оскільки воно забезпечує контроль та оптимізацію енерговитрат, технічний моніторинг і діагностику обладнання, ефективне використання енергоресурсів, облік і розрахунки за спожиту електроенергію тощо. При вимірюванні енергії визначається кількість спожитої енергії за певний період часу. Точне вимірювання енергії допомагає виявити енерговитратні процеси або обладнання і приймати рішення про модернізацію або зміну режиму роботи для зниження витрат. Лічильники електричної енергії дозволяють точно фіксувати кількість спожитої енергії. Для калібрування і перевірки засобів вимірювання електричної енергії використовуються еталони електричної потужності та енергії. Вони мають різну структурну побудову, яка забезпечує відтворення різних практично використовуваних одиниць вимірювання електричної енергії. Проводяться міжнародні звірення національних еталонів електричної потужності та енергії, які стають основою для калібрувальних та вимірювальних можливостей (СМС) національних лабораторій. Для проведення вимірювань активної та реактивної електричної енергії змінного струму на промисловій частоті таких вимірювань використовуються високоточні еталони, які будуються на основі традиційної структурної схеми. Лише невелика кількість лабораторій національних метрологічних інститутів і призначених інститутів мають опубліковані СМС записи у Базі ключових звірень (KCDB) Міжнародного бюро з мір і ваг (BIPM) стосовно вимірювання активної та реактивної електричної енергії. Ці лабораторії мають невизначеність вимірювання у доволі широких межах у широкому діапазоні значень енергії: від 16 до 700 рртм для активної енергії; від 16 до 400 рртм для реактивної енергії.

Ключові слова

Електрична енергія, електрична потужність, вимірювання електричної енергії, активна енергія, реактивна енергія, еталон, калібрувальні та вимірювальні можливості.

1. Вступ

Вимірювання електричної енергії має велике значення в різних сферах, оскільки воно забезпечує контроль та оптимізацію енерговитрат, технічний моніторинг і діагностику обладнання, ефективне використання енергоресурсів, облік і розрахунки за спожиту електроенергію тощо. При вимірюванні енергії визначається кількість спожитої енергії за певний період часу. Точне вимірювання енергії допомагає виявити енерговитратні процеси або обладнання і приймати рішення про модернізацію або зміну режиму роботи для зниження витрат. Лічильники електричної енергії дозволяють точно фіксувати кількість спожитої енергії [1, 2].

Вимірювання електроенергії дозволяє контролювати роботу електричних пристроїв та виявляти несправності або неефективну роботу. Такі вимірювання допомагають оператору мережі балансувати навантаження та запобігати перевантаженню системи, забезпечуючи стабільну та надійну роботу електричних мереж. Воно має критичне значення для забезпечення ефективного та безпечного використання енергії, а також допомагає споживачам електроенергії краще управляти ресурсами, підтримувати стабільну роботу електричних систем і зменшувати негативний вплив на навколишнє середовище [3–5].

Для калібрування і перевірки засобів вимірювання електричної енергії використовуються еталони електричної потужності та енергії. Такі еталони забезпечують високу точність вимірювань як електричної потужності, так і енергії. Вони мають різну структурну побудову, яка забезпечує відтворення різних практично використовуваних одиниць вимірювання електричної енергії. Використання різних одиниць вимірювання енергії пов'язане з як з певними історичними, так і регіональними та національними особливостями їх використання. Проводяться міжнародні звірення національних еталонів електричної потужності та енергії, які стають основою для калібрувальних та вимірювальних можливостей (СМС) лабораторій національних метрологічних інститутів (НМІ) і призначених інститутів (ІІ) [6, 7].

2. Недоліки

Вимірюванню електричної енергії присвячено доволі багато наукових робіт. Теоретичним і більш практичним аспектам, пов'язаним з вимірюванням електроенергії, присвячена [1]. Узагальненні причини похибок

лічильників електроенергії описані у [2]. У [3] представлено детальний огляд приладів для вимірювання потужності та енергії, наведено принцип роботи кількох пристроїв, а також їх застосування та переваги/недоліки. У [4] розглянуто заходи щодо забезпечення точності вимірювань електричної енергії. У [5] запропоновано модель системи обліку електроенергії на основі даних інтелектуальних датчиків. У [8] обговорюються різні метрологічні аспекти точних вимірювань електричної енергії.

У [9–12] проведена оцінка потенційного впливу гармонійних збурень на точність лічильника електроенергії, зокрема впливу гармонічних спотворень вимірюваного сигналу. Однак, актуальним питанням залишається дослідження особливостей проведення прецизійних вимірювань електричної енергії, використання одиниць електричної енергії, побудови еталонів для відтворення цих одиниць і подання СМС національних лабораторій.

3. Мета

Метою статті є представлення результатів досліджень особливостей проведення прецизійних вимірювань електричної енергії, використання одиниць електричної енергії та побудови еталонів для відтворення цих одиниць, калібрувальних та вимірювальних можливостей національних лабораторій.

4. Основні використовувані одиниці вимірювання електричної енергії

При вимірюванні електричної потужності та енергії на змінному струмі (АС) на промисловій частоті (від 40 Гц до 70 Гц) визначенню підлягають різні типи електричної потужності чи енергії: активна, реактивна, повна тощо [1].

У колах однофазного синусоїдального електричного струму активна потужність (P) може бути визначена через напругу і струм, використовуючи вираз:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

де U – напруга, I – сила струму, φ – кут зсуву фаз між напругою та струмом.

У таких же колах реактивна потужність (Q) також може бути визначена через напругу і струм, використовуючи вираз:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi, \quad (2)$$

Повна потужність (S) є величиною, яка пов'язана з активною та реактивною потужністю рівнянням:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (3)$$

де при індуктивному навантаженні $Q > 0$, а при ємнісному $Q < 0$.

У таких же колах активна електрична енергія (W), яка є реальною енергією, що споживається навантаженням для виконання певної роботи, через ці ж параметри визначається як:

$$W = U \cdot I \cdot t = P \cdot t, \quad (4)$$

де t – інтервал часу.

Реактивна енергія є енергією, що використовується для створення магнітних та електричних полів у індуктивних і ємнісних елементах. Ця енергія характеризує енергію, не перетворену на корисну роботу. Вона виникає через наявність індуктивних або ємнісних навантажень, які створюють зсув фаз між струмом і напругою. На відміну від активної енергії реактивна енергія не виконує корисної роботи, а лише коливається між джерелом і навантаженням.

Повна енергія є сумою активної та реактивної енергій, яка показує загальну кількість електричної енергії в системі. Вона є сумою активної (корисної) та реактивної (некорисної) складових енергії і поєднує як роботу, так і енергію, що повертається до джерела.

Електрична енергія у Міжнародній системі одиниць (SI) визначається в джоулях (Дж). Проте на практиці, особливо в побутових і промислових розрахунках, частіше використовують іншу внесистемну одиницю – кіловат-години (кВт·год). Один джоуль дорівнює енергії, яку потрібно витратити, щоб перемістити заряд в один кулон через електричний потенціал у один вольт. Одна кіловат-година дорівнює 3,6 мільйона джоулів.

Для вимірювання електричної потужності та енергії змінного струму (АС) на промисловій частоті використовують кілька одиниць вимірювань, кожна з яких відповідає певним типам потужності чи енергії (дані з Базис ключових звірень (KCDB) Міжнародного бюро з мір і ваг (BIPM)) [13]:

- Джоуль (1 Дж = 1 Вт·с) – одиниця вимірювання електричної енергії;
- Ват (1 Вт = 1 Дж/с) – основна одиниця вимірювання активної потужності;
- вар (вар) – одиниця вимірювання реактивної потужності;
- вольт-ампер (В·А) – одиниця вимірювання повної потужності;
- Ват-секунда (Вт·с) і Ват-година (1 Вт·год = 1 Вт·3600 с = 3600 Дж) – одиниці вимірювання активної енергії;
- кіловат-година (1 кВт·год = 1000 Вт·год = 3,6 МДж) – одиниця вимірювання активної енергії;
- квар-година (1 квар·год = 1000 вар·год) – одиниця вимірювання реактивної енергії;
- вольт-ампер-година (В·А·год) – одиниця вимірювання повної енергії.

5. Особливості еталонів для відтворення одиниць електричної енергії

Основні особливості вимірювання електричної енергії полягають у оцінюванні різних типів електричної енергії, використанню трифазних і однофазних систем і типів електролічильників тощо. У трифазних системах вимірювання енергії складніше, оскільки кожна фаза може мати свої параметри. Тому використовуються трифазні лічильники, що враховують усі три фази окремо. В однофазних системах процес вимірювання простіший, оскільки потрібно вимірювати лише одну фазу.

Еталон одиниці електричної енергії має забезпечувати високу точність вимірювань протягом тривалого часу. Для цього використовуються стабільні джерела енергії, прецизійні електронні компоненти та контрольовані умови експлуатації. В еталоні формуються еталонні сигнали напруги та струму на промисловій частоті (50 Гц чи 60 Гц), які подаються на вимірювач електричної потужності чи енергії. Джерела напруги та струму повинні бути стабільними і точними для запобігання навіть мінімальним відхиленням від заданих параметрів. Спотворення форми гармонічні сформованого сигналу можуть впливати на точність вимірювання енергії. Фазовий зсув між фазними струмом і напругою безпосередньо впливає на розрахунок активної та реактивної енергій.

Звичайно структурна схема високоточного еталону електричної енергії включає:

- прецизійні джерела АС напруги (U) і струму (I), які формують еталонні напруги і струм, які подаються на об'єкт калібрування;
- прецизійний лічильник електричної енергії або вимірювальна система з максимально низькою похибкою;
- перетворювачі напруги і струму, які забезпечують точні вимірювання струму та напруги;
- прецизійні вимірювачі напруги постійного струму (DC);
- фазометр для вимірювання фазових зсувів між струмами і напругами (для трифазних систем);
- блок керування чи комп'ютерна система.

Блок керування забезпечує роботу еталона, виконує збір і аналіз даних з усіх компонентів системи. Практично всі сучасні еталони автоматизовані та включають: спеціалізоване програмне забезпечення для керування роботою еталона і збору даних; автоматичне регулювання параметрів, таких як напруга і струм; зберігання та обробку результатів вимірювання для подальшого аналізу.

На рис. 1 наведена найбільш поширена у національних лабораторіях структурна схема еталону електричної енергії.

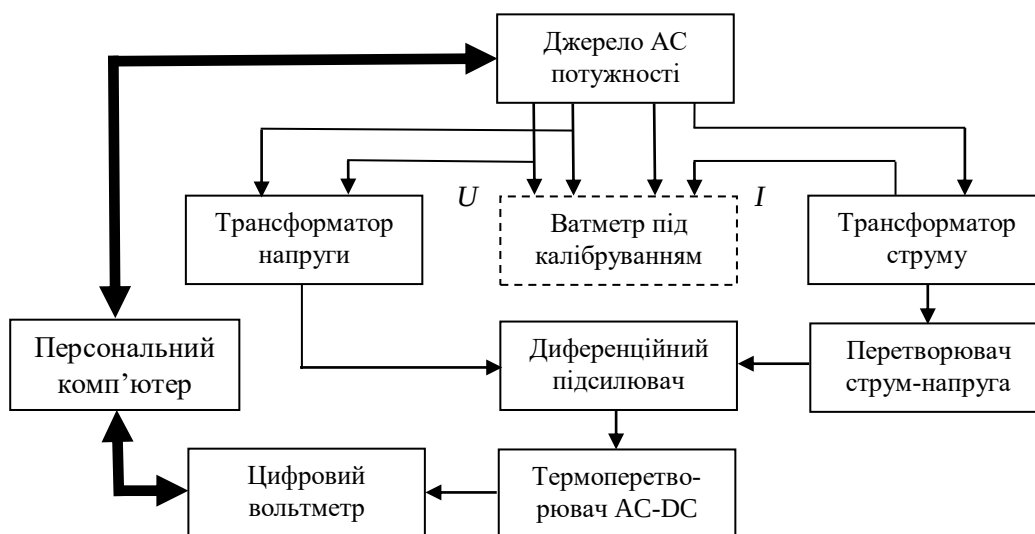


Рис. 1. Структурна схема еталону електричної енергії.

Для високоточних еталонів електричної енергії калібруються їх складові ЗВТ за такими метрологічними характеристиками:

- електрична АС напруга (В);
- сила електричного АС струму (А);
- частота змінного струму (Гц);
- фазовий кут між струмами і напругами (для трифазних систем).

Національні еталони електричної енергії мають проходити періодичні звірення з національними еталонами інших країн для забезпечення порівнюваності результатів вимірювання енергії. Таких міжнародних звірень проводиться не дуже багато і не дуже часто [13]. Серед них можна виділити звірення регіональної метрологічної організації GULFMET – GULFMET.EM-S5 щодо енергії [14], які як пілотна лабораторія організувало і провело Державне підприємство «Укрметртестстандарт» (UMTS), Київ, Україна.

6. Калібрувальні та вимірювальні можливості національних лабораторій

У рамках Угоди про взаємне визнання національних еталонів і калібрувальних та вимірювальних можливостей Міжнародного комітету з мір і ваг (CIPM) – CIPM MRA [15] для кожної країни-учасниці Угоди CIPM MRA призначається лише один національний інститут як НМІ, а інші діють як ПІ.

Для визнання в рамках Угоди CIPM MRA для публікації СМС записів [7] НМІ (ПІ) потрібна їх участь у міжнародних звіреннях еталонів [6], а лабораторія НМІ (ПІ) повинна керувати системою управління якістю [16]. Для розрахунку невизначеності вимірювань як при звіреннях еталонів, так і при оформленні СМС потрібно використовувати Настанову із вираження невизначеності вимірювань (GUM) [17].

Аналіз СМС записів щодо електричної енергії змінного струму для НМІ (ПІ) у KCDB показав результати, наведені у табл. 1 і на рис. 2. 23 НМІ (ПІ) (22 – для активної енергії, 14 – для реактивної енергії) мають загалом 78 СМС записів. UMTS має такі СМС записи і представлений у табл. 1 і на рис. 2.

Таблиця 1. СМС записи щодо електричної енергії змінного струму для НМІ (ПІ) у KCDB станом на кінець 2024 р.

НМІ	Країна	СМС	Одиниця	Невизначеність			
				Реактивна енергія		Реактивна енергія	
				Значення	Одиниця	Значення	Одиниця
BEV	Австрія	6	Ws, var s, VA s,	80	$\mu\text{Ws (VAs)}^{-1}$	80	$\mu\text{var s (VAs)}^{-1}$
CEM	Іспанія	6	Wh, VAh, var h	30	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$	30	$\mu\text{var h (VAh)}^{-1}$
INACAL	Перу	6	Wh	133	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$		
Trescal	Данія	6	Wh, J	25	$\mu\text{J (VAs)}^{-1}$		
VNIIM	РФ	5	Ws, var s	50	$\mu\text{Ws (VAs)}^{-1}$	400	$\mu\text{var s (VAs)}^{-1}$
INMETRO	Бразилія	4	Wh, var h	25	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$	25	$\mu\text{var h (VAh)}^{-1}$
NIST	США	4	J, var s	35	$\mu\text{J (VAs)}^{-1}$	45	$\mu\text{var s (VAs)}^{-1}$
UMTS	Україна	4	Ws, var s	85	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$	140	$\mu\text{var h (VAh)}^{-1}$
BIM	Болгарія	4	W s, var s	16	$\mu\text{Ws (VAs)}^{-1}$	16	$\mu\text{var s (VAs)}^{-1}$
CMS	Тайвань	3	Wh, var h	240	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$	240	$\mu\text{var h (VAh)}^{-1}$
EIM	Греція	3	Ws, Wh, var s, var h	70	$\mu\text{Ws (VAs)}^{-1}$	70	$\mu\text{var s (VAs)}^{-1}$
UME	Туреччина	2	Ws, var s	200	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$	200	$\mu\text{var h (VAh)}^{-1}$
MIKES	Фінляндія	2	Wh, var h	120	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$	250	$\mu\text{var h (VAh)}^{-1}$
RISE	Швеція	2	Wh, var h	80	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$	80	$\mu\text{var h (VAh)}^{-1}$
SMU	Словаччина	2	Ws, var s	80	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$		
UDEC	Чилі	2	Wh	120	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$		
CENAM	Мексика	2	var s			20	$\mu\text{var h (VAh)}^{-1}$
CENAMEP	Панама	2	Wh	95	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$		
DMDM	Сербія	2	Ws	116	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$		
SASO-NMCC	Саудівська Аравія	2	Ws, var s	60	$\mu\text{Ws (VAs)}^{-1}$	60	$\mu\text{var s (var s)}^{-1}$
EMI	ОАЕ	2	Wh, var h	260	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$	270	$\mu\text{var h (VAh)}^{-1}$
BFKH	Угорщина	2	Ws	200	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$		
NMIM	Малайзія	1	Wh	700	$\mu\text{Wh (Wh)}^{-1}$		
NMISA	Південна Африка	1	J	50	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$		
JEMIC	Японія	1	J	32	$\mu\text{J (VAs)}^{-1}$		
METAS	Швейцарія	1	Ws	100	$\mu\text{Ws (VAs)}^{-1}$		
VSL	Нідерланди	1	Wh	50	$\mu\text{Wh (VAh)}^{-1}$		
Загалом		78					

У СМС записах щодо електричної енергії змінного струму використано одиниці вимірювання, які відображені на рис. 3. Для активної енергії найчастіше використовуються одиниці Wat·год і Wat·с (по 20 разів), а для реактивної енергії – var·год (9) і var·с (14) [13].

У СМС записах НМІ (ПІ) наведено невизначеності вимірювання активної та реактивної електричної енергії змінного струму, які відображені на рис. 4 і 5 відповідно. Невизначеність вимірювання у широкому діапазоні значень енергії: для активної енергії змінюється від 16 до 700 ppm, а для реактивної енергії – від 16 до 400 ppm [13]. Слід відзначити, що UMTS має СМС записи як для активної, так і для реактивної енергій.

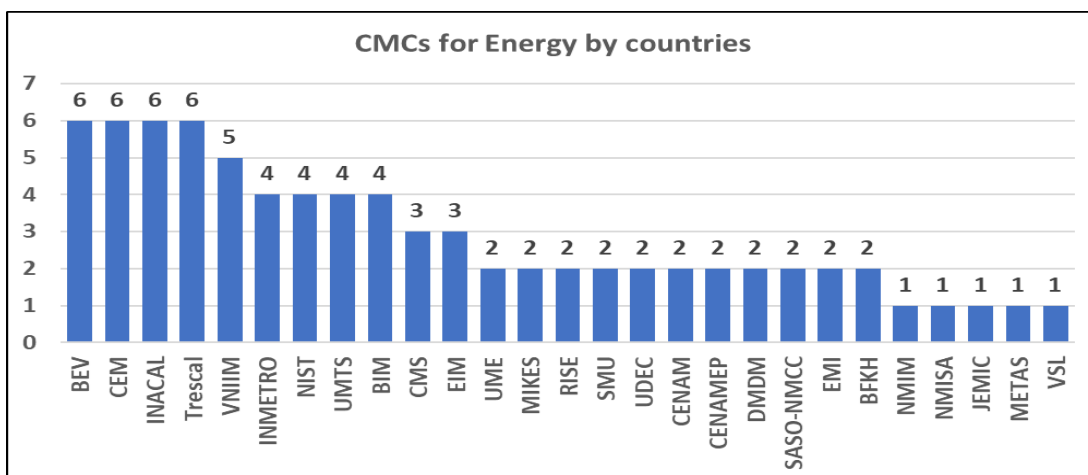


Рис. 2 СМС для енергії за країнами.

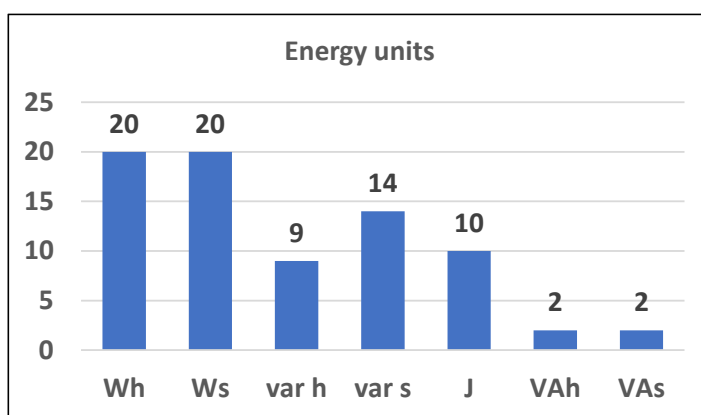


Рис. 3 СМС для енергії за одиницями.

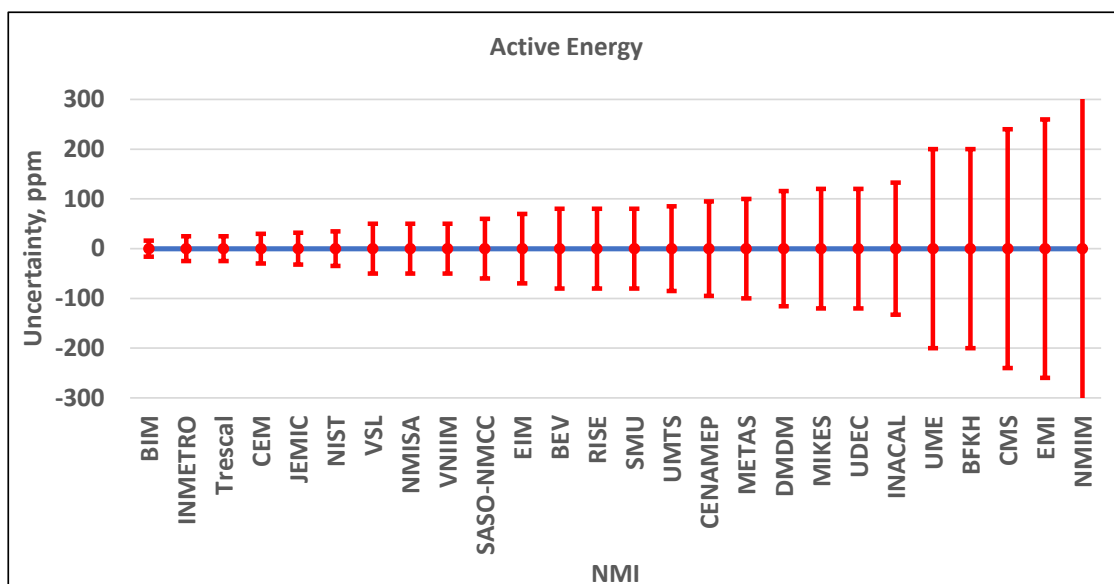


Рис. 4 Невизначеність вимірювань для активної енергії за НМІ (ПІ).

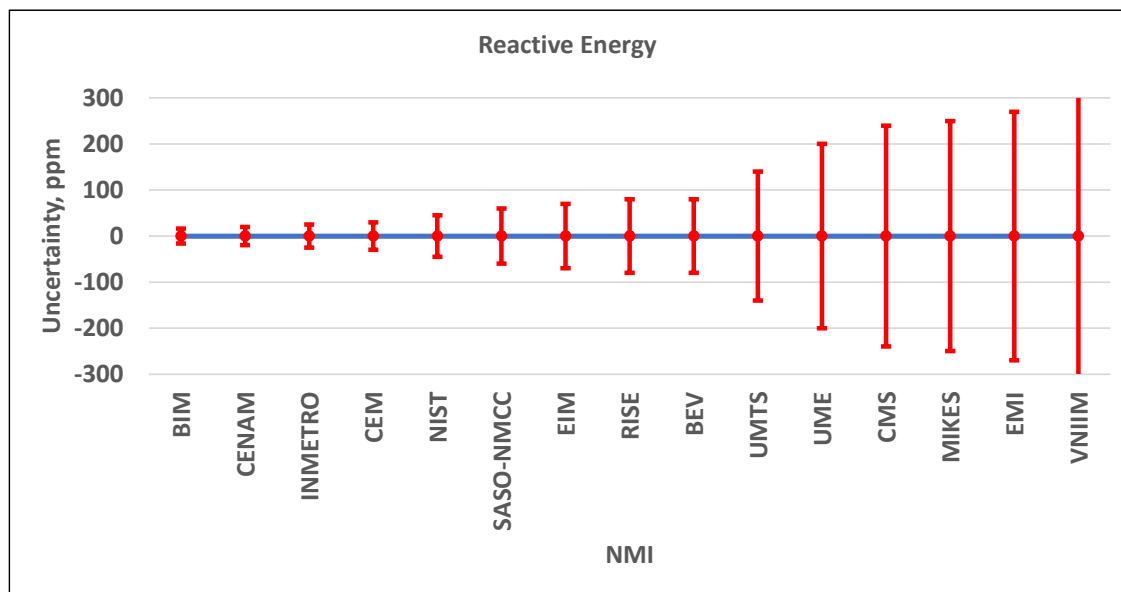


Рис. 5 Невизначеність вимірювань для реактивної енергії за НМІ (ПІ).

7. Висновки

При вимірюванні активної та реактивної електричної енергії змінного струму на промисловій частоті використовуються різні одиниці вимірювання. Для проведення таких вимірювань використовуються високоточні еталони, які будуються на основі традиційної структурної схеми. Лише невелика кількість лабораторій НМІ (ПІ) мають опубліковані СМС записи у KCDB стосовно вимірювання активної та реактивної електричної енергії, серед яких і український ПІ – ДП «Укрметрестандарт». Ці лабораторії мають невизначеність вимірювання у доволі широких межах у широкому діапазоні значень енергії: від 16 до 700 ppm для активної енергії; від 16 до 400 ppm для реактивної енергії.

Список використаної літератури

- [1] A. Brandolini and A. Gandelli, "Power and Energy Measurements," Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Electrical Engineering, vol. II, <https://www.eolss.net/ebooklib/bookinfo/electrical-engineering.aspx>.
- [2] W. Yang et al., "Analysis of factors influencing electric energy measurement in power systems", AIP Advances 1 February 2024; 14 (2): 025032, doi: 10.1063/5.0190948.
- [3] A. Babuta et al., "Power and energy measurement devices: A review, comparison, discussion, and the future of research," Measurement, vol. 172, 2021, 108961, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108961.
- [4] E. Buzac, "Trends in electrical energy measurement and the performance of modern electricity meters," 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Romania, 2012, pp. 783-786, doi: 10.1109/ICEPE.2012.6463837.
- [5] H. Li et al., "Research on Model Construction of Electric Energy Metering System Based on Intelligent Sensor", Advances in Mathematical Physics, 2023, 1296165, 8 p., doi: 10.1155/2023/1296165.
- [6] CIPM MRA-G-11, "Measurement comparisons in the CIPM MRA. Guidelines for organizing, participating and reporting," BIPM, 2021.
- [7] CIPM MRA-G-13, "Calibration and measurement capabilities in the context of the CIPM MRA. Guidelines for their review, acceptance and maintenance," BIPM, 2022.
- [8] Skórkowski A. et al., "The Errors of Electronic Energy Meters That Measure Energy Consumed by LED Lighting," Energies 15, 2022, no. 9: 3254, doi: 10.3390/en15093254.
- [9] Bartolomei L. et al., "Testing of Electrical Energy Meters Subject to Realistic Distorted Voltages and Currents," Energies, 13, 2020, no. 8, doi: 10.3390/en13082023.
- [10] R. Wanga and J. Yuan, "Study on electrical energy meter for energy measuring under harmonics condition", International Conference on Advanced Electronic Science and Technology (AEST 2016), December 2016, pp. 311–316, doi: 10.2991/aest-16.2016.40.
- [11] L. D. Jovanović, "A Novel TDM-Based High-Precision Wattmeter," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 6, pp. 1083-1088, June 2017, doi: 10.1109/TIM.2017.2653458.
- [12] Y. Baghzouz and O. T. Tan, "Harmonic Analysis of Induction Watthour Meter Performance," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 2, pp. 398-406, Feb. 1985, doi: 10.1109/TPAS.1985.319055.
- [13] The BIPM key comparison database (KCDB). Available at: <http://kcdb.bipm.org>.
- [14] Velychko O., et al., "Final report on GULFMET supplementary comparison of AC energy (GULFMET.EM-S5)," Metrologia, vol. 57, 2020, issue 1A, 01003, doi: 10.1088/0026-1394/57/1A/ 01003.

- [15] CIPM MRA, “Mutual Recognition of National Measurement Standards, of Calibration and Measurement Certificates issued by National Metrology Institutes,”. BIPM, 2003.
- [16] CIPM MRA-G-12, “Quality management systems in the CIPM MRA Guidelines for monitoring and reporting,” BIPM, 2021.
- [17] JCGM100, “Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM),” BIPM, 2008.