

ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

УДК 621.373.42(088.8)

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.155>

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК МОБІЛЬНИХ ЗАСОБІВ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Ю.Ф. Тесик^{1*}, докт. техн. наук, **О.Л. Карасинський**^{1**}, канд. техн. наук, **Р.М. Мороз**^{1***},
канд. техн. наук, **С.Ю. Пронзалева**^{2****}, канд. техн. наук, **М.В. Зайков**^{2*****}

1 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

2 – НВО ТОВ «ЕЛВІН, Лтд»,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail:

Проведено порівняльний аналіз характеристик портативних калібраторів із різними принципами побудови каналів відтворення режимних параметрів електричної мережі. Показано переваги та недоліки каналів із використанням силових вихідних трансформаторів струму й напруги. Запропоновано об'єднання функцій імпульсного перетворення й гальванічної розв'язки в каналі відтворення режимних параметрів електричної мережі. Показано переваги безтрансформаторних каналів відтворення режимних параметрів електричної мережі. Описано принцип дії пристроїв, наведено структурні схеми й формули, що відображають процеси у відповідних ланцюгах. Наведено фото й характеристики калібраторів режимних параметрів електричної мережі на основі трансформаторних і безтрансформаторних каналів відтворення. Бібл. 8, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: відтворення, метрологічне забезпечення, мобільні калібратори, електроенергія, підсилювачі потужності.

В Україні експлуатується понад 20 мільйонів засобів обліку електричної енергії (ЕЕ). Із цієї кількості щороку підлягає перевірці близько 3 мільйонів електролічильників. Крім того, існує велика кількість аналізаторів якості ЕЕ й електронних вимірювачів потужності, які теж потребують періодичної перевірки.

Зростання обсягів робіт, пов'язаних із перевіркою метрологічних характеристик (МХ) засобів обліку ЕЕ, стимулюють удосконалення засобів їхнього метрологічного забезпечення.

Стандартами на засоби обліку ЕЕ регламентуються такі вимоги до засобів метрологічного забезпечення, за допомогою яких відбувається перевірка:

- точність відтворення сигналів на рівні 0,02 %;
- стабільність сигналів на рівні 0,01 %;
- рівень нелінійних спотворень відтворюваних сигналів напруг і струмів – 0,1 %;
- динамічний діапазон від 1 мА до 500 А за струмом і від 0,001 до 1000 В за напругою;
- смуга пропускання сигналів від 40 до 5 кГц;
- вихідна потужність каналу струму й напруги на рівні 0,5–1 кВт;
- час, необхідний для перевірки одного електролічильника – 15–20 хвилин.

До цього часу в Україні користуються морально застарілим метрологічним устаткуванням (МУ), яке було вироблено в СРСР і не забезпечує потреб сучасного виробництва через невідповідність вимогам стандартів ГОСТ 30206-94, ГОСТ 30207-94 і відсутність автоматизації процесу повірки та документування. Це призводить до суттєвого погіршення МХ вимірювальних пристроїв за результатами їхнього калібрування.



Сучасне обладнання провідних фірм Європи коштує мільйони євро. Тому в Україні необхідно розвивати власні технології і випускати серійно метрологічне обладнання, яке було б сучасним за технічним та ергономічним рівнями і доступним за ціною. Таким чином, зазначений напрямок досліджень є надзвичайно актуальним.

Великими підприємствами за кордоном серійно випускається стаціонарне й мобільне метрологічне устаткування.

Розглянемо більш детально принципи побудови мобільних приладів контролю метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки.

Мета роботи – провести порівняльний аналіз і виявити найбільш перспективні принципи побудови перетворювачів мобільних приладів метрологічного устаткування для забезпечення вимог існуючих стандартів на засоби відтворення електричних величин, розкрити невідповідність існуючих засобів відтворення режимних параметрів електроенергії щодо вимог стандартів на засоби вимірювальної техніки в частині частотного діапазону сертифікованих приладів обліку та вказати на методи покращення метрологічних характеристик калібраторів режимних параметрів електричних мереж.

Мобільні метрологічні установки завжди користувалися значним попитом серед фахівців метрологічних і електроенергетичних структур. Це пояснюється тим, що перевірка стану засобів вимірювальної техніки та їхня атестація на місцях експлуатації є набагато технологічнішою й дешевшою. Передусім це стосується випадків, коли необхідно проводити оперативне відновлення трансформаторних підстанцій та комірок обліку підприємств. Найбільшим попитом серед мобільних МУ користуються калібратори режимних параметрів електроенергії [1].

Створення мобільних засобів метрологічного забезпечення, крім високих метрологічних характеристик і функціональних можливостей, потребує низки конструктивних вимог. До них слід віднести малу вагу й габарити, стійкість до ударів і вібрацій, розширений діапазон робочих температур, зручний дизайн.

Особливу увагу під час створення подібної апаратури, крім забезпеченню високих метрологічних характеристик, слід приділити зменшенню її ваги й габаритів.

Порівняємо характеристики мобільних метрологічних установок, в основі яких лежать різні методи прецизійного перетворення і формування керованих тестових сигналів, якими є трифазні системи струмів і напруг [2]:

$$\begin{aligned} u_A(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} U_{Ak} \sin(k\omega t + \psi_{UAk}), & i_A(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} I_{Ak} \sin(k\omega t + \psi_{IAk}), \\ u_B(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} U_{Bk} \sin(k\omega t + \psi_{UBk}), & i_B(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} I_{Bk} \sin(k\omega t + \psi_{IBk}), \\ u_C(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} U_{Ck} \sin(k\omega t + \psi_{UCk}), & i_C(t) &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} I_{Ck} \sin(k\omega t + \psi_{ICk}), \end{aligned} \quad (1)$$

де $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$, $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – миттєві значення вихідних сигналів, U_{Ak} , U_{Bk} , U_{Ck} , I_{Ak} , I_{Bk} , I_{Ck} , ψ_{UAk} , ψ_{UBk} , ψ_{UCk} , ψ_{IAk} , ψ_{IBk} , ψ_{ICk} – амплітуди й початкові кути зсуву фаз k -х гармонік фазних напруг і струмів, K_{\max} – найбільший номер заданої гармоніки, $\omega = 2\pi f_1$, де f_1 – частота 1-ї гармоніки.

Оскільки за вимогами стандартів [3] вихідні кола всіх джерел струмів і напруг мають бути гальванічно розв'язаними з вхідними колами приладів, які перевіряються, на виходах джерел каліброваних сигналів встановлюють трансформатори. Розглянемо принципи побудови калібраторів, у вихідних каскадах яких встановлено трансформатори струмів і напруг.

На рис. 1 зображено структурну схему одного з каналів багатofазного джерела відтворення струмів і напруг [4, 5]. До його складу входять: багатofазний керований генератор БФКГ, підсилювач на основі широтно-імпульсної модуляції ПШІМ, вихідний трансформатор Т, блок живлення БЖ, кола зворотного зв'язку КЗЗ. Штрихованою лінією позначено місце, де забезпечується гальванічна розв'язка каналу.

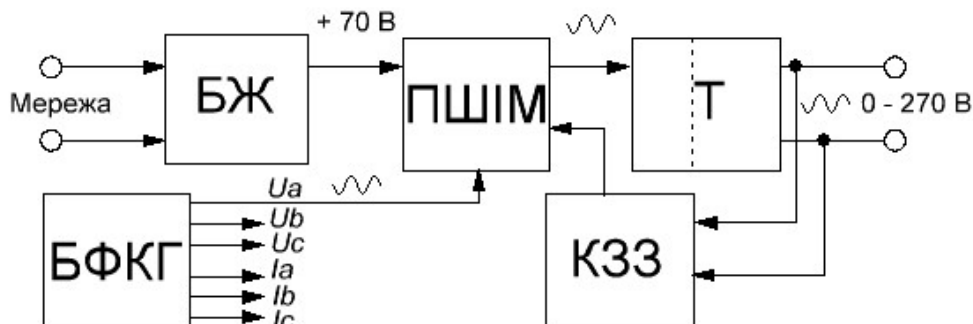


Рис. 1

На виході багатофазного керованого генератора формується шість низьковольтних калібрувальних сигналів: три напруги і три струми з керованими за програмою амплітудами, кутами зсуву фаз і частотою. Ці сигнали надходять на блоки ПШІМ, де підсилюються до необхідного рівня за амплітудою й потужністю, і далі через трансформатор Т надходять на входи засобів вимірювання.

Перевагою цієї структури є можливість підняття вихідної потужності до 1 кВт і більше. До недоліків такого підходу до вирішення задачі створення каналів відтворення сигналів мережі слід віднести обмежений частотний діапазон відтворюваних сигналів, що викликає зменшення амплітуди вихідних сигналів і фазовий зсув векторів вихідних напруг і струмів відносно вхідних. У результаті впливу трансформаторів вираз (1) можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned}
 u_A(t) &= \sum_{k=1}^{K \max} U_{Ak} K_{Ak} \sin(k\omega t + \psi_{U_{Ak}} + \varphi_{Ak}), & i_A(t) &= \sum_{k=1}^{K \max} I_{Ak} K_{Ak} \sin(k\omega t + \psi_{U_{Ak}} + \varphi_{Ak}), \\
 u_B(t) &= \sum_{k=1}^{K \max} U_{Bk} K_{Bk} \sin(k\omega t + \psi_{U_{Bk}} + \varphi_{Bk}), & i_B(t) &= \sum_{k=1}^{K \max} I_{Bk} K_{Bk} \sin(k\omega t + \psi_{U_{Bk}} + \varphi_{Bk}), \\
 u_C(t) &= \sum_{k=1}^{K \max} U_{Ck} K_{Ck} \sin(k\omega t + \psi_{U_{Ck}} + \varphi_{Ck}), & i_C(t) &= \sum_{k=1}^{K \max} I_{Ck} K_{Ck} \sin(k\omega t + \psi_{U_{Ck}} + \varphi_{Ck}),
 \end{aligned} \quad (2)$$

де K_{Ak} , K_{Bk} , K_{Ck} , φ_{Ak} , φ_{Bk} , φ_{Ck} – паразитні коефіцієнти передачі й кути зсуву фаз гармонік відтворюваного сигналу у відповідних вихідних колах, викликані застосуванням трансформатора.

Крім того, габарити й вага вихідних трансформаторів каскадів залежать від їхньої потужності та робочої частоти джерел. Якщо вихідна потужність одного каналу сягає 100 Вт, то маса трансформатора на частоті мережі наближається до 2 кг, а загальна вага багатофазного джерела збільшується до 12 кг. Суттєво зростають і габарити метрологічного устаткування.

Фото калібратора, розробленого вченими Інституту електродинаміки НАН України і впровадженого в серійне виробництво, із такою структурою та його характеристики представлено на рис. 2 і в табл. 1.

Габарити та вага калібраторів, виготовлених провідними фірмами світу [7, 8], також лишаються громіздкими й великими. Наприклад, калібратор МТЕ PCS400.3 має вагу 23,5 кг, а габарити – 520×195×365 мм.

Більш прийнятним для вирішення поставленої задачі є багатофазне джерело відтворення струмів і напруг, у якому гальванічна розв'язка забезпечується самим імпульсним перетворювачем. На рис. 3 подано схему одного з каналів багатофазного джерела відтворення струмів і напруг. До його складу входять цифровий багатофазний керований генератор БФКГ, підсилювач на основі широтно-імпульсної модуляції ПШІМ, міст М, фільтр Ф, контролер К, фазовий детектор ФД, амплітудний детектор АД, схема управління СУ.



Рис. 2

Таблиця 1

Діапазон напруг, В	1 – 270
Діапазон струмів, А	0,005 – 12
Похибка установки напруг та струмів, не більше, %	0,05
Коефіцієнт гармонік, %	0,5
Потужність в одному каналі струму або напруги, ВА	250
Діапазон робочих частот, Гц	10 – 2000
Похибка установки частот, Гц	0,1
Діапазон робочих кутів зсуву фаз між струмами та напругами, град.	0 ± 180
Точність установки кутів зсуву фаз, ± град.	0,1
Часова нестабільність, %/хв	0,1
Коефіцієнт несиметрії трифазних систем напруг, не більше, %	1

Як видно з рис. 3, у представленій структурі відсутній силовий вихідний трансформатор, а штрихована лінія гальванічної розв'язки перемістилась у вузол широтно-імпульсного перетворення.

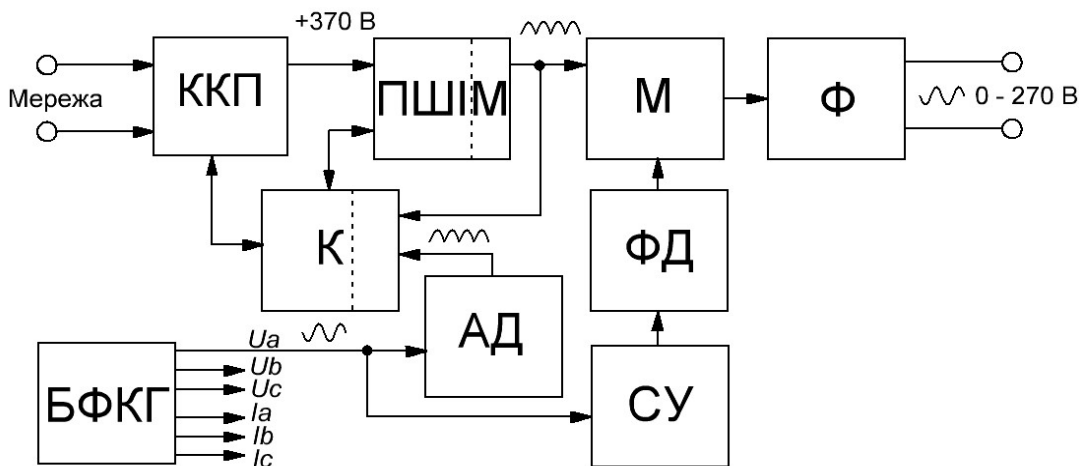


Рис. 3



Рис. 4

Застосування такої структури для перетворення калібрувальних сигналів дало змогу зменшити вагу калібратора до 15 кг, а габарити – до 560×360×140 мм. Фото та характеристики установки представлено на рис. 4 і в табл. 2. Відсутність вихідних силових трансформаторів дає змогу суттєво розширити частотний діапазон відтворення режимних параметрів електромережі й отримати вихідні сигнали, які описуються виразом (1).

Установка, виготовлена за цією структурною схемою, призначена для проведення повірки робочих засобів обліку, приладів контролю режимних параметрів та параметрів якості ЕЕ на місцях їхнього використання.

Переваги:

- можливість транспортування та швидкої організації метрологічної лабораторії в "польових" умовах;
- розширений діапазон робочих частот;

• "all-in-one" система: еталон параметрів ЕЕ, джерело напруги та струму, міні-комп'ютер, ударостійкий кейс.

Таблиця 2

Основна похибка за параметрами якості ЕЕ, %	0,05
Діапазон напруг, В	5 – 380
Діапазон струмів, А	0,01 – 10
Коефіцієнт гармонік, %	0,5
Діапазон робочих частот, Гц	10 – 5000
Потужність живлення, Вт	≤ 100
Маса, кг	≤ 15
Розміри, мм	560×140×360

Актуальність автоматизованої мобільної метрологічної установки для відтворення режимних параметрів електроенергії полягає в тому, що в разі її використання можливо проводити перевірку стану обладнання безпосередньо на об'єкті, який зазнав пошкодження, що дасть змогу значно скоротити час на відновлення. Також зручним є застосування під час відновлення та ремонтування військової техніки в польових умовах.

На сьогодні для метрологічних лабораторій електроенергосистем НЕК «Укренерго» виготовлено й атестовано в ДП «Укрметрестандарт» 11 таких засобів метрологічного забезпечення.

Висновок. Порівняльний аналіз принципів побудови каналів відтворення режимних параметрів мереж мобільних метрологічних установок показав, що найбільш перспективними за масогабаритними характеристиками і робочим частотним діапазоном є безтрансформаторні структури.

Для уникнення використання вихідних силових трансформаторів у каналах відтворення режимних параметрів мережі слід використовувати запропонований спосіб об'єднання функцій забезпечення гальванічної розв'язки і ШІМ у високочастотних імпульсних підсилювачах каналів.

Роботу виконано за держбюджетною темою: «Розвиток теоретичних основ прецизійного вимірювання режимних параметрів електричних мереж і створення нових методів відтворення електричних величин» (Шифр ЮПТЕР-7). Державний реєстраційний номер теми 0120U002004.

1. Фомичев Ю.М., Силушкин С.В. Современное состояние автоматизированных систем поверки средств измерений параметров электрической энергии. *Вестник науки Сибири*. 2013. № 2 (8). С. 47–55.
2. Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф. Многофазный генератор для моделирования параметров трехфазной сети. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка*. 2001. № 1(7). С. 98–104.
3. ДСТУ EN 61010-1:2014. Вимоги щодо безпечності контрольно-вимірювального та лабораторного електричного устаткування. Частина 1. Загальні вимоги (EN 61010-1:2010, IDT) URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=84230
4. Коровина О.А, Шатохин А.А. Обзор характеристик генераторов-калибраторов для поверки и аттестации средств измерения показателей качества электроэнергии. *Вестник МЭИ*. 2007. № 5. С. 86–89.
5. Тесик Ю.Ф., Мороз Р.М. Сравнительный анализ характеристик измерительных усилителей мощности, применяемых в метрологическом оборудовании. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. № 37. С. 114–124.
6. Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф. Многофазный генератор для моделирования параметров трехфазной сети. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка*. 2001. № 1 (7). С. 98–104.
7. Technical information for PPS400.3. URL: <https://www.mte.ch/products/portable-test-equipment/power-sources-37/pps-4003-65>
8. Technical Data Zera MT551. URL: https://www.zera.de/wpcontent/uploads/MT551_SPECS_EXT_GB_V400.pdf

MOBILE METROLOGICAL EQUIPMENT CHARACTERISTICS COMPARATIVE ANALYSIS

Yu.F. Tesik¹, O.L. Karasinskiy¹, R.M. Moroz¹, S.Iu. Pronzeleva², M.V. Zaikov²

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

2 – NGO LLC «ELVIN, Ltd»,

Beresteiskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: luckyposhta@gmail.com

A comparative analysis of the characteristics of portable calibrators with different principles of construction of channels for reproducing mode parameters of the electric network was carried out. The advantages and disadvantages of

channels using current and voltage power output transformers are shown. It is proposed to combine the functions of impulse conversion and galvanic isolation in the channel of reproducing the mode parameters of the electric network. The advantages of transformerless channels for reproducing the mode parameters of the electric network are shown. The principle of operation of the devices is described, the structural diagrams and formulas reflecting the processes in the relevant circuits are given. The photo and characteristics of the calibrators of mode parameters of the electric network based on transformer and transformerless reproduction channels are given. Ref. 8, fig. 4, tables 2.

Key words: reproduction, metrological equipment, mobile meter testing, electricity, power amplifiers.

1. Fomichev Yu.M., Silushkin S.V. The current state of automated systems for verification of measuring instruments for electrical energy parameters. *Vestnik nauki Sibiri*. 2013. No 2 (8). Pp. 47–55. (Rus)
2. Karasinskiy O.L., Tesik Yu.F. Multiphase generator for modeling the parameters of a three-phase network. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy. Elektrotehnika*. 2001. No 1(7). Pp. 98–104. (Rus)
3. State Standard of Ukraine EN 61010-1:2014. Requirements for the safety of control and measuring and laboratory electrical equipment. Part 1. General requirements. (EN 61010-1:2010, IDT) URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=84230 (Ukr)
4. Korovina O.A, Shatohin A.A. Overview of the characteristics of generator-calibrators for verification and attestation of means of measuring power quality indicators. *Vestnik MEI*. 2007. No 5. Pp. 86–89. (Rus)
5. Tesik Yu.F., Moroz R.M. Review of performance measuring power amplifiers applied in generators-calibrators and metrological equipment. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy. Elektrotehnika*. 2014. No 37. Pp. 114–124. (Rus)
6. Karasinskiy O.L., Tesik Yu.F. Multiphase generator for modeling the parameters of a three-phase network. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy. Elektrotehnika*. 2001. No 1 (7). C. 98–104. (Rus)
7. Technical information for PPS400.3. URL: <https://www.mte.ch/products/portable-test-equipment/power-sources-37/pps-4003-65>
8. Technical Data Zera MT551. URL: https://www.zera.de/wp-content/uploads/MT551_SPECS_EXT_GB_V400.pdf

Надійшла: 01.06.2023

Прийнята: 15.06.2023

Submitted: 01.06.2023

Accepted: 15.06.2023