

ПРЕЦИЗІЙНИЙ БАГАТОФАЗНИЙ КАЛІБРАТОР ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

О.Л. Карасінський^{*}, канд.техн.наук, Ю.Ф. Тесик^{**}, докт.техн.наук, Р.М. Мороз^{***}, канд.техн.наук
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
 e-mail: luckyposhta@gmail.com

Запропоновано та проаналізовано принципи функціонування спеціалізованого багатофазного калібратора (БФК) напруг і струмів, в якому параметри сигналів багатофазного генератора (БФГ) коригуються за результатами вимірювань прецизійного вимірювача параметрів (ВП) сигналів електричних мереж за алгоритмом мікроконтролера (МК). Розроблено і досліджено алгоритм корекції параметрів вихідних сигналів БФГ шляхом урахування результатів вимірювання вказаних параметрів в ВП. Запропоновано еквівалентну схему корекції n -ої гармоніки. За результатами досліджень у серійне виробництво впроваджено високоточний калібратор параметрів сигналів електричної мережі. Бібл. 20, рис. 5.

Ключові слова: багатофазний калібратор параметрів електроенергії, трифазна мережа, мікроконтролер, аналого-цифровий перетворювач, цифро-аналоговий перетворювач, корекція похибок.

Вступ. Під час налагодження та перевірки пристроїв для вимірювання параметрів електричної енергії (лічильники електроенергії, вимірювачі показників якості та ін.) [1–2] передбачається застосування багатофазних генераторів (БФГ) [3–7] для моделювання реальних параметрів сигналів електричної мережі – напруг до декількох сотень вольт, струмів до сотень ампер та показників якості електроенергії [8]. Створення генераторів з високими метрологічними характеристиками, які забезпечують зазначені діапазони струмів і напруг, досить амбітна задача, пов'язана в основному зі складністю побудови потужних вихідних підсилювачів з нормованими метрологічними характеристиками з похибками на рівні десятих і сотих часток відсотка [9–17].

Мета роботи. Розробити і дослідити принцип функціонування БФК та корекції його вихідних сигналів з урахуванням результатів вимірювання параметрів напруг і струмів в ВП за загальним алгоритмом МК та створити на цій основі мультифункціональний, прецизійний і портативний калібратор параметрів електроенергії.

Основні матеріали дослідження. Досвід по розробці засобів вимірювання параметрів трифазних мереж і аналіз потреб в метрологічному забезпеченні показали доцільність застосування автономних повірочних установок і високоточних мультиметрів – вимірювачів параметрів

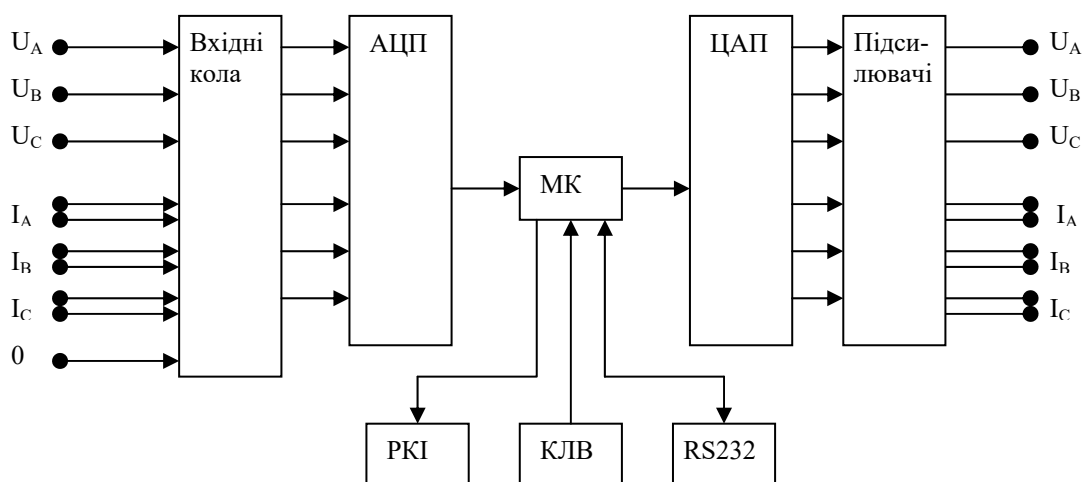


Рис. 1

електричних мереж. Причому бажано було б, щоб ці прилади входили в єдиний комплект або блок. Досвід з керування БФГ з метою його корекції за допомогою ПЕОМ [18], а також напрацьована схемотехніка і програмне забезпечення МК [19, 20], надали змогу розробити БФГ та ВП у вигляді переносного малогабаритного калібратора, блок схему якого наведено на рис. 1.

Центральним елементом цієї схеми є МК, забезпечений традиційними для нього атрибутами – клавіатурою (КЛВ), рідинно-кристалічним індикатором (РКІ) і схемою сполучення через інтерфейс RS232 або будь-який інший. Вхідні сигнали напруг U_A, U_B, U_C і струмів I_A, I_B, I_C через вхідні кола надходять на входи багатоканального аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Кодовані вибірки миттєвих значень використовуються для розрахунку параметрів, що вимірюються. Ці параметри виводяться на РКІ та/або через інтерфейс RS232 в зовнішню ПЕОМ. Одночасно у відповідних розділах меню в МК або через інтерфейс вводяться параметри вихідних сигналів БФГ. Ці параметри за певними алгоритмами перетворюються в коди миттєвих значень вибірок вихідних сигналів, які заносяться в цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), а потім підсилюються [19]. Таким чином, маємо як би два пристрої (ВП і БФГ), керовані одним МК. За допомогою перемикачів (не показані на рис. 1) пристрій можна налагодити для роботи в декількох режимах: власне тільки ВП або тільки генератор або у вигляді системи, охопленої зворотним зв'язком, коли виходи БФГ з'єднуються з входами ВП, як це показано на рис. 2.

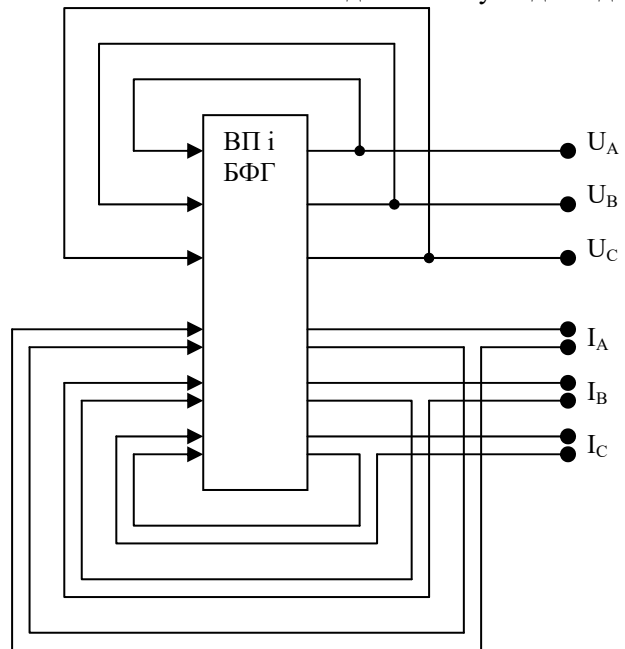


Рис.2

Зазвичай задають першу (основу) гармоніку і кілька вищих гармонік. У нашому варіанті реалізації пристрою є можливість задавати крім першої гармоніки ще до трьох вищих гармонік з довільними номерами від 2-ї до 40-ї. Вихідні сигнали БФГ описуються виразами [19]

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

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

Вимірювання вихідних параметрів БФГ в ВП засноване на використанні дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), яке дає змогу отримати ортогональні складові гармонік сигналів, за якими потім розраховуються їхні діючі значення і кути зсуву фази (КЗФ) [20].

Спочатку в лабораторних умовах за розірваному зворотному зв'язку (рис. 1) здійснюється калібрування ВП. Це досить трудомісткий і тривалий процес, він виконується на стадії виготовлення і здачі в експлуатацію виробу та за чергового калібрування, яке проводиться з періодичністю один - три роки. Потім замикається зворотний зв'язок (рис. 2), і пристрій переходить в робочий режим БФГ з нормованими значеннями параметрів.

Блок схему алгоритму функціонування ВП та БФГ наведено на рис. 3. Ця схема відображає послідовність перетворення і використання масивів даних, які відображають процес вимірювання в ВП та корекцію параметрів, що задаються БФГ. Параметри БФГ, що задаються, встановлюються або вручну (за допомогою клавіатури МК), або заносяться через інтерфейс. В результаті отримуємо

масив **ParamsX** із заданих діючих значень і КЗФ гармонік. Окрема процедура використовується для установки частоти основної гармоніки і відповідного їй періоду дискретизації вхідних і вихідних сигналів. Параметри **ParamsX** коригуються з урахуванням параметрів **ParamsZ**, отриманих в результаті вимірянних значень вихідних сигналів. У підсумку отримуємо скориговані значення параметрів **ParamsY**, на підставі яких синтезуються миттєві значення вихідних сигналів БФГ, які виводяться в ЦАП.



Рис. 3

Виміряні параметри **ParamsZ** отримуємо в ВП за допомогою ДПФ, при цьому частота дискретизації вхідних сигналів ВП збігається з частотою дискретизації вихідних сигналів БФГ, відповідно на виміряні діючі значення і КЗФ гармоніки не впливають інші гармоніки. Тому алгоритм корекції вихідних сигналів БФГ ідентичний для всіх каналів напруг і струмів та заданих гармонік. На рис. 4 наведено еквівалентну схему корекції n -ої гармоніки в одному з каналів.

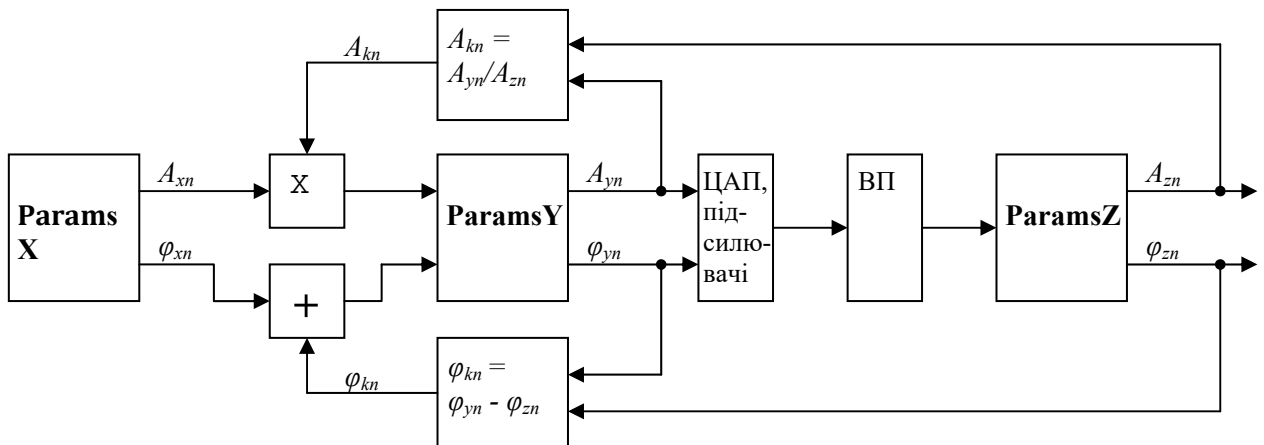


Рис. 4

З сукупності заданих параметрів **ParamsX** виділяються амплітуда A_{xn} та КСФ φ_{xn} . Амплітуда A_{xn} множиться на поправочний коефіцієнт A_{kn} , а до заданого значення φ_{xn} додається коригувальне значення φ_{kn} . Таким чином отримуємо складові **ParamsY**

$$A_{yn} = A_{xn} \cdot A_{kn}, \quad \varphi_{yn} = \varphi_{xn} + \varphi_{kn}, \quad (2)$$

які використовуються для синтезу кодів миттєвих значень сигналів на виходах ЦАП.

Виміряні значення параметрів A_{zn} і φ_{zn} використовуються задля розрахунку коригувальних значень

$$A_{kn} = A_{yn} / A_{zn}, \quad \varphi_{kn} = \varphi_{yn} + \varphi_{kz}. \quad (3)$$

Цикл вимірювання вихідних параметрів БФГ **ParamsZ**, обчислення поправочних коефіцієнтів і корекція даних **ParamY**, що посилаються в БФГ, можна повторити кілька разів, до тих пір, поки похибки завдання сигналів не досягнуть прийнятних значень.

Пари значень амплітуди і КСФ (A_{xn}, φ_{xn}) , (A_{yn}, φ_{yn}) , (A_{zn}, φ_{zn}) , (A_{kn}, φ_{kn}) зручно представляти в комплексній формі $A \cdot e^{j\varphi}$, відповідно у вигляді комплексних чисел X , Y , Z , K . Операції множення $A_{xn} \cdot A_{kn}$ і складання $\varphi_{xn} + \varphi_{kn}$ у формулі (2) відповідають множенню комплексних чисел $X \cdot K$. Тоді схему на рис. 4 можна привести до наступної схеми (рис. 5), а формули (2) і (3) приймуть вигляд

$$K = Y / Z, \quad Y = X \cdot K. \quad (4)$$

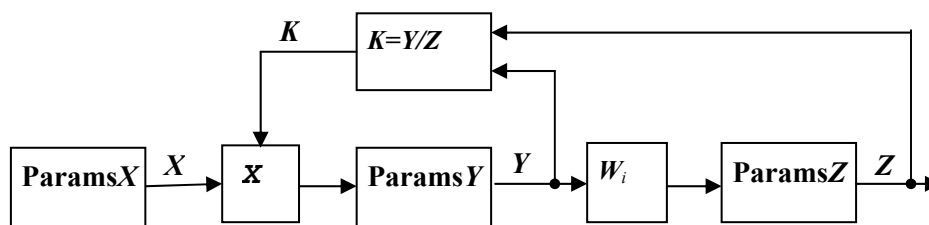


Рис. 5

Розглянемо в загальному вигляді як відбувається процес корекції похибок БФГ. Стан системи (для n -го каналу і деякої гармоніки) після i -го циклу корекції похибок буде Y_i , Z_i , K_i . Передбачається, що задане значення сигналу X залишається незмінним. При цьому величини сигналів (кодів) на вході і виході n -го каналу БФГ пов'язані співвідношенням

$$Z_i = Y_i \cdot W_i, \quad (5)$$

де W_i – коефіцієнт передачі n -го каналу в інтервалі часу, коли проводиться ця корекція. Для наступного $(i+1)$ -го циклу корекції відповідно до формули (4), отримаємо

$$K_{i+1} = Y_i / Z_i, \quad Y_{i+1} = X \cdot K_{i+1}, \quad Z_{i+1} = Y_{i+1} \cdot W_{i+1}, \quad (6)$$

де W_{i+1} – коефіцієнт передачі n -го каналу вже в інтервалі часу, коли проводився наступний $(i+1)$ -й цикл корекції.

З формул (5) і (6) можна знайти значення вихідного сигналу n -го каналу БФГ після завершення $(i+1)$ -го циклу корекції. Після всіх перетворень отримаємо

$$Z_{i+1} = X \cdot W_{i+1} / W_i. \quad (7)$$

Як видно з формули (7) після кількох циклів корекції значення вихідних сигналів БФГ сходяться до сталого значення, тому що значення коефіцієнтів передачі каналів W в суміжних інтервалах корекції мало відрізняються один від одного. Незначна зміна цих коефіцієнтів можлива через нелінійність коефіцієнта передачі підсилювача або через тимчасову нестабільність. В ідеальному випадку у разі лінійних підсилювачів або незначній зміні рівня сигналів урівноваження системи відбувається за один цикл. Фактично, особливо при перемиканні між точками перевірки, для яких рівні сигналів відрізняються в десятки разів, може знадобитися від двох до п'яти циклів ітерацій, причому, як показали спостереження, практично вже відразу після першої ітерації похибки завдання сигналів не перевищують 1%, а після завершення врівноваження – похибки завдання сигналів не більше 0.01%. Тобто, виходячи з (7), похибка завдання сигналів оцінюється за показниками зразкового ВП і граничне значення похибки БФГ буде визначатися похибкою ВП.

З викладеного випливає, що сутність принципу полягає в покроковому коригуванні похибок відтворюваних калібратором амплітуд і кутів зсуву фаз першої і вищих гармонійних складових параметрів сигналів електричних мереж шляхом формування ортогональних складових сигналів

першої і вищих гармонік БФГ, перетворення ортогональних складових у складні сигнали мережі, прецизійному вимірюванні цих сигналів, розкладанні вимірюваних ВП сигналів на ортогональні складові, порівнянні ортогональних складових відтворених і вимірюваних сигналів, формуванні корегуючих сигналів і введенні поправок у пам'ять БФГ для отримання нормованих значень параметрів відтворюваних сигналів

Таким чином, точність завдання сигналів повністю визначається похибкою ВП, оскільки в процесі управління системою параметри вихідних сигналів БФГ приймають задані значення, а похибка завдання цих сигналів оцінюється за результатами вимірювання зразкового ВП. Як показує досвід авторів, створення зразкового вимірювального приладу в більшості випадків більш простіше завдання, ніж створення зразкового генератора з аналогічними метрологічними характеристиками. Викладені теоретичні засади, які полягають в поєднанні функціонування зразкового ВП та БФГ, було використано під час розробки прецизійного портативного БФК задля калібрування трифазних лічильників електроенергії.

Висновок. Запропонований ітераційний принцип корекції похибок відтворення параметрів мережних сигналів з урахуванням результатів вимірювання прецизійного вимірювального перетворювача дав змогу створити унікальний багатофазний калібратор ДНСТ-3к, який пройшов державні метрологічні випробування, налагоджено серійний випуск. Основні його характеристики та калібратора Fluke 6105A для порівняння наведено у таблиці.

Характеристики (основні)	Калібратор ДНСТ-3к	Fluke 6105A
Діапазон фазних напруг СКЗ, В	1 – 270	0 – 356,4
Діапазон фазних струмів СКЗ, А	0,005 – 12	0 – 7.4
Похибка відтворення СКЗ струму і напруги, %	0,01	0,027
Похибка відтворення потужності і електричної енергії, %	0,02	0,0 до ± 0.338
Похибка відтворення параметрів якості електроенергії, %	0,03	–
Діапазон відтворення основної частоти, Гц	47 – 53	16 – 850
Похибка відтворення частоти, Гц	0,01	0,1
Діапазон робочих кутів зсуву фаз між струмами та напругами, град.	± 180	± 180
Похибка установки кутів зсуву фаз, град.	0,01	0,014 – 0,02
Маса, кг	не більше 13	23
Ціна, млн. грн.	0,33	3

Варто відзначити, що характеристики створеного БФК знаходяться на рівні кращих світових взірців, але вартість нижча більше, ніж на порядок.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвиток теоретичних основ прецизійного вимірювання режимних параметрів електричних мереж і створення нових методів відтворення електричних величин» (Юнітер-7), КПКВК 6541030.

PRECISION MULTIPHASE ELECTRICAL POWER STANDARD FOR THE PARAMETERS OF ELECTRICAL NETWORKS MEASURING DEVICES CALIBRATION

O.L. Karasinskiy, Yu.F. Tesik, R.M. Moroz
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: luckyposhta@gmail.com

The principles of functioning of the specialized multiphase Electrical Power Standard (EPS) combined with the measuring instrument (MI) of parameters of signals of electric networks controlled by the general microcontroller are offered and analyzed. Methods and algorithms of correction of parameters of output signals of EPS by taking into account results of measurement of the specified parameters in MI are developed and investigated. An equivalent correction scheme of n-th harmonic is proposed. References 20, figures 5.

Key words: Electrical Power parameters Standard, calibrator, three-phase network, microcontroller, analog-to-digital converter, digital-to-analog converter, error correction.

1. Means for measuring electrical and magnetic quantities. General technical conditions. GOST 22261-94. Interstate standard. Minsk: Publishing house of standards. 1995. (Rus)
2. AC active energy meters are static. Accuracy classes 1 and 2. State Standard of Ukraine IEC 61036:2001. Kyiv: DP UkrNDNTs, 2004. 40 p. (Ukr)
3. The 6100B/6105A Electrical Power Quality Calibrator. URL: https://eu.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/6105a-6100b-electrical-power-quality-calibrat?quicktabs_product_details=0 (accessed 02.07.2021).
4. Three-phase programmable source of alternating current and voltage "Energoforma 3.3". Users manual. URL: [https://www.mars-energo.ru/assets/files/software/61/rp-energoforma\(1\).pdf](https://www.mars-energo.ru/assets/files/software/61/rp-energoforma(1).pdf) (accessed 02.07.2021).
5. Source of current and voltage. URL: <https://www.evm.ua/obraztsovoe-oborudovanie/istochniki-nagruzki/istochnik-toka-i-naprjazhenija-pps-400-3> (accessed 04.07.2021)
6. AC calibrators "Resource-K2". Users manual. URL: <http://www.entp.ru/documentation/K2/2/download?PHPSESSID=1916a76953d42973c94cf4c766f08c54> (accessed 12.03.2013)
7. MT Product Series. URL: https://www.zera.de/fileadmin/pdf_and_more/Products/Meters/Portable/MT500_SPECS_EXT_GB_V400.pdf (accessed 02.07.2021).
8. Electromagnetic compatibility. Part 4-30. Test and measurement methods. Measurement of electricity quality indicators (IEC 61000-4-30:2008, IDT). State Standard of Ukraine IEC 61000-4-30. Kyiv: DP UkrNDNTs, 2010. 126 p. (Ukr)
9. Laug O. B. A precision power amplifier for power/energy calibration applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1987. IM-36(4). Pp. 994–1000. DOI: <https://doi.org/10.1109/tim.1987.6312597>
10. Laug O.B. A 100 A, 100 kHz transconductance amplifier. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 45. No 2. Pp. 440-444. April 1996. DOI: <https://doi.org/10.1109/19.492763> .
11. Ihlenfeld W.G. A Simple, Reliable, and Highly Stable AC Voltage Amplifier for Calibration Purposes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2005. Vol. 54(5). Pp. 1964–1967. DOI: <https://doi.org/10.1109/tim.2005.853229>
12. Zajec P., Nastran J. Power calibrator using switched mode voltage source. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2000. Vol. 49. No. 4. Pp.790-794.
13. Lavric H., Voncina D. Zajec P., Pavlovchich F., Nastran J. A precision hybrid amplifier for voltage calibration systems. *Informacije MIDE M*. 2004. Vol. 34. No 1. Pp. 37 – 42.
14. Mohns E., Fricke S., Pauling F. An AC power amplifier for testing instrument transformer test equipment. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*. Ottawa, ON, Canada. 2016. Pp. 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEM.2016.7540559>
15. Bryan C. Waltrip, Owen B. Laug, Thomas L. Nelson A 600 V AC Voltage Amplifier for Power Measurements. *Transactions on instrumentation and measurement*. 2015. Vol. 64. No 6. Pp. 1373-1377. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEM.2014.6898268>
16. Tesik Yu.F., Karasinskiy O.L., Moroz R.N. Digital-to-analog converter for higher current applications in portable metrology power sources. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 82-84. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2016.05.082> (Ukr)
17. Liu J., Zhang D., Wang M., Huang L., Zhao D. A Cascaded Linear High-Voltage Amplifier Circuit for Dielectric Measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016. Vol. 63. No 3. Pp. 1834-1841. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2498129> .
18. Karasinskiy O.L., Tesik Yu.F., Shuvalov G.I., Kolomiets E.A. Algorithm for the calibration of a polyphase generator for modeling the parameters of a three-phase network. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2006. No 5. Pp. 77-79. (Rus)
19. Karasinskiy O.L., Tesik Yu.F. Multiphase generator for simulating the parameters of a three-phase network. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2001. Pp. 98-104. (Rus)
20. Karasinskiy O.L., Tesik Yu.F. Microprocessor-based measuring transducer of electrical network parameters. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2003. No 5. Pp. 69-75. (Rus)

Надійшла 07.06.2021
Остаточний варіант 09.09.2021