

В. В. Мошаренков

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ МЕТОДИЧНИХ ПОХИБОК КАЛІБРУВАННЯ ЕЛЕКТРОВІМІРЮВАЛЬНИХ ПРИБЛАДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ СИГНАЛАМИ ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ ТИПУ «МЕАНДР»

Анотація. Метою статті є розробка методу оцінки методичних похибок калібрування електровимірювальних приладів змінного струму сигналами прямокутної форми. **Результати.** Проведена оцінка методичних похибок калібрування ЕВПЗС сигналами прямокутної форми типу «меандр» для двох типових видів вимірювальних ланцюгів приладів. Розглядаються прикладні аспекти оцінки методичних похибок при калібруванні електровимірювальних приладів змінного струму сигналами прямокутної форми типу «меандр» для двох типових видів вимірювальних ланцюгів приладів, без компенсації і з компенсацією. За результатами аналізу отримані аналітичні вирази для відносних значень методичних похибок у вимірювальних ланцюгів приладу без компенсації і з компенсацією. Підтверджено за результатами аналізу можливість застосування сигналів прямокутної форми типу «меандр» для калібрування електромагнітних приладів.

Ключові слова: сигнали прямокутної форми, електровимірювальні пристрої змінного струму, методична похибка, калібрування.

Вступ

Рівень розвитку науки і техніки в значній мірі визначаються точністю, надійністю і стабільністю властивостей вимірювальних приладів. Електровимірювальні прилади змінного струму (ЕВПЗС) представляють собою один з найбільш масових видів вимірювальних засобів. Калібрування ЕВПЗС виконуються за традиційною схемою [1]. Тобто, аналоговими сигналами синусоїдальної форми, причому метрологічні вимоги до калібраторів таких сигналів постійно підвищуються. Задоволення цих вимог все більш викликає більші схемотехнічні труднощі та вартість. Але з розвитком цифрової вимірювальної техніки, в тому числі цифрових генераторів (та калібраторів) сигналів [2], певний науковий інтерес викликає проблема калібрування ЕВПЗС сигналами не синусоїдальної, а прямокутної форми типу «меандр». Для відтворення яких можуть бути використані цифрові калібратори, які мають значні переваги в порівнянні з аналоговими калібраторами синусоїдальних сигналів.

Аналіз літератури. В даний час досить докладно досліджені особливості калібрування і повірки електромеханічних вимірювальних приладів змінного струму стосовно калібрувальних сигналів прямокутної форми в [3], а більш глибокі дослідження, результати яких підтвердили новизну і ефективність цього підходу, наведено в [4]. Перші теоретичні дослідження проведені і для повірки електромеханічних вимірювальних приладів змінного струму аналоговими сигналами спеціальної форми [5, 6].

Але цього недостатньо для розвитку теорії калібрування ЕВПЗС аналоговими сигналами прямокутної форми до такого рівня, який дозволить потім перейти до калібрування ЕВПЗС цифроаналоговими сигналами довільної форми [7-10].

Метою статті є розробка методу оцінки методичних похибок калібрування електровимірювальних приладів змінного струму сигналами прямокутної форми. Дане питання потребує послідовного

вирішення низки теоретичних і прикладних завдань. Тому, проведена оцінка методичних похибок калібрування ЕВПЗС сигналами прямокутної форми типу «меандр» для двох типових видів вимірювальних ланцюгів приладів.

Основний матеріал

Виходячи з вище сказаного, природнім виглядає дослідження можливості калібрування ЕВПЗС із застосуванням сигналів прямокутної форми типу «меандр» ближчими до реальних вимірюваним сигналам ніж синусоїдальний сигнал.

Часова діаграма калібрувального сигналу (КС) прямокутної форми типу «меандр» приведена на рис. 1, аналітично вона описується виразом

$$u(t) \equiv u = \begin{cases} -U_0, & \text{если } 0 \leq t \leq T/2; \\ U_0, & \text{если } T/2 \leq t \leq T, \end{cases}$$

де U_0 – амплітуда КС прямокутної форми типу «меандр»; T – період КС прямокутної форми типу «меандр».

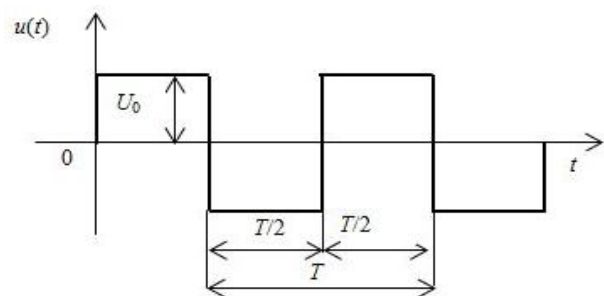


Рис. 1. Калібрувальний сигнал прямокутної форми типу «Меандр»

Представимо функцію $u(t)$ рядом Фур'є, тоді маємо [7]:

$$u(t) = \frac{4U_0}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin(2k+1)\omega t}{2k+1},$$

де $\omega = 2\pi/T$ – колова частота основної (першої) гармоніки КС прямокутної форми типу «меандр» $u(t)$.

Отримаємо вираз для градуовальної характеристики ЕВПЗС при входному сигналі прямокутної форми. У цьому випадку напруга може бути подана рядом Фур'є.

$$U_{2k+1} = \frac{4U_0}{\pi(2k+1)}, \quad k = \overline{0, \infty}, \quad (1)$$

де U_0 – амплітуда сигналу прямокутної форми типу «меандр».

Тоді амплітуда $(2k+1)$ -ої гармоніки струму $i(t)$ в вимірювальному ланцюзі ЕВПЗС, що калібрується, визначається виразом:

$$I_{2k+1} = \frac{U_{2k+1}}{R[1 + \varepsilon \xi(jk)]}, \quad k = \overline{0, \infty}, \quad (2)$$

де $\varepsilon = Z_1/R$;

$$\xi(q) = Z_1(q\omega_0)/q;$$

$$q = j\omega/\omega_0;$$

$$Z_1 = |Z_1(j\omega_0)| -$$

модуль частотно-залежної складової комплексного повного опору вимірювального ланцюга $Z(j\omega)$; R – еквівалентний активний опір, ε сумою вхідного активного опору калібруатора (генератора), активного опору калібруемого ЕВПЗС і обмежувального (додаткового) опору, що підключається послідовно з приладом (при калібруванні вольтметрів – може бути відсутнім); ω_0 – колова частота основної гармоніки сигналів прямокутної форми типу «меандр».

Градуовальна характеристика калібрування ЕВПЗС визначається квадратом середнього квадратичного значення струму з урахуванням (1), (2) маємо:

$$I^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} I_{2k+1}^2 = \frac{4U_0^2}{\pi^2 R^2} S, \quad (3)$$

де
$$S = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} = \frac{\pi^2}{4} + \pi \sum_n \frac{A_n}{q_n^2} \operatorname{th} \frac{\pi q_n}{2}; \quad (4)$$

q_n, A_n – відповідно полюси і лишки дрібно-раціональної функції

$$R(q) = \frac{1}{[1 + \varepsilon \xi(q)][1 + \varepsilon \xi(-q)]}.$$

Всі електромагнітні амперметри та вольтметри змінного струму можливо поділити на дві групи: прилади, в яких мала індуктивність вимірювального механізму не компенсована ємністю (рис. 2, а), і прилади, в яких така компенсація здійснюється (рис. 2, б).

Отримаємо вираз для методичної похибки ЕВПЗС першої та другої груп.

Для приладів першої групи справедливі рівняння

$$R = r + R_0;$$

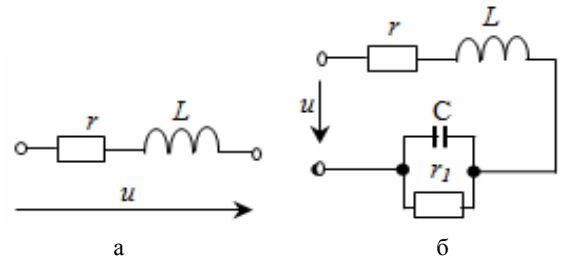


Рис. 2. ЕВПЗС першої(а) та другої (б) груп

$$Z_1 = pL;$$

$$\xi(q) = q;$$

$$\varepsilon = \omega_0 L/R.$$

В цьому випадку є по одному полюсу в лівій ($q_1 = -1/\varepsilon$) і в правій ($q_1 = 1/\varepsilon$) напівплощинах.

З виразу (4) знаходимо, що

$$S = \frac{\pi^2}{4} - \frac{\pi}{2} \varepsilon = \frac{\pi^2}{4} \left(1 - \frac{2\varepsilon}{\pi}\right). \quad (5)$$

Підставляючи рівняння (5) до виразу (3), отримаємо

$$I = \frac{U_0}{R} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\pi}\right). \quad (6)$$

Використовуючи рівність (6) отримаємо вираз для відносної методичної похибки калібрування ЕВПЗС першої групи при калібруванні сигналами типу «меандр»:

$$\delta I_1 = \frac{I - U_0/R}{U_0/R} = -\frac{\varepsilon}{\pi} = -\frac{\omega_0 L}{\pi R}. \quad (7)$$

Аналогічно для відносної методичної похибки калібрування ЕВПЗС другої групи сигналами типу «меандр» отримаємо

$$\delta I_2 = -\frac{2}{\pi} \left(\frac{A_1}{q_1^2} + \frac{A_2}{q_2^2} \right).$$

Після обчислення полюсів q_n і лишок A_n функції $R(q)$, маємо

$$A_1 = \frac{1 - \alpha^2 q_1^2}{\varepsilon^2 (q_1 - q_2)(q_1 + q_2) 2q_1},$$

$$A_2 = \frac{1 - \alpha^2 q_2^2}{\varepsilon^2 (q_2 - q_1)(q_1 + q_2) 2q_2}.$$

Підставимо цей вираз у формулу (5) і після перетворень маємо

$$\delta I_2 = \frac{(1 + 2\alpha^2 - \alpha^2 \varepsilon) \varepsilon}{4\pi \alpha (1 - \varepsilon)}, \quad (8)$$

де
$$\alpha = r_1 \omega_0 C; \quad \varepsilon = \frac{\alpha^2 \beta}{1 + \alpha^2}; \quad \beta = r_1/R.$$

При $\varepsilon, \alpha \ll 1$ співвідношення (8) суттєво спрощується:

$$\delta I_2 = \frac{\varepsilon}{\pi \alpha} = \frac{\gamma}{\pi} = \frac{\omega_0 L}{\pi R}. \quad (9)$$

Отже, з виразів (7), (9) видно, що модулі відносної методичної похибки калібрування електромагнітних амперметрів і вольтметрів сигналами прямокутної форми типу «меандр» однакові та визначаються ставленням індуктивного опору вимірювального механізму на робочій частоті до активного опору вимірювального ланцюга приладу.

Висновки

Проведено оцінку методичних похибок калібрування електровимірювальних приладів змінного струму сигналами прямокутної форми типу

«меандр» для двох типових видів вимірювальних ланцюгів приладів: без компенсації і з компенсацією індуктивності котушки вимірювального механізму.

Отримані аналітичні вирази (7), (9) для відносних значень методичних похибок для обох видів вимірювальних ланцюгів приладу, з яких видно, що похибки рівні по модулю та протилежні за знаком.

Результати аналізу методичних похибок амперметрів і вольтметрів показує, що ці похибки на частоті 50 Гц достатньо малі порівняно з класом точності, що калібрують ся, і ними можна знехтувати. Це підтверджує можливість застосування для калібрування електромагнітних амперметрів і вольтметрів сигналів прямокутної форми типу «меандр».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов. – М.: ДМК Пресс, 2009 –384с.
2. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. Изд.2-е, перераб. и доп. – М.: СОЛОН-Пресс, 2010 –400с.
3. Минц М. Я. Об использовании сигналов прямоугольной формы для поверки электромеханических приборов / М. Я. Минц, В. Н. Чинков. // Измерительная техника. – 1980. – № 3. – С.42-43.
4. Минц М. Я. Поверка электромеханических приборов сигналами прямоугольной формы с регулируемой скважностью / М. Я. Минц, В. Н. Чинков // Измерительная техника.– 1987. – № 4. – С.64-66.
5. 6. Минц М.Я. О поверке электромеханических измерительных приборов сигналами специальной формы / М. Я. Минц, В. Н. Чинков // Измерительная техника. – 1989. – № 8. – С.63-65.
6. Чинков В. Н. Прецизионные методы и калибраторы воспроизведения коэффициентов несимметрии трехфазной системы синусоидальных напряжений / В. Н. Чинков, В. В. Мошаренков // Український метрологічний журнал. – 2013. – № 3. – С. 18 – 21.
7. Денисенко А.Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника: справочное пособ. / А. Н. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 704 с.
8. Чинков В. М. Методика синтезу вимірювальних сигналів для контролю технічного стану зразків озброєння при локальному обмеженні / В. М. Чинков, С. В. Герасимов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – Вип. 1 (14). – С. 194-197.
9. Electronic Test Instruments: Analog and Digital Measurements. Author: Robert A. Witte Publisher: Prentice Hall, 2002, 371 p.
10. Testing Signals for Electronics: Criteria for Synthesis / S. Herasimov, V. Pavlii, O. Tymoshchuk, M. Yu. Yakovlev, D. Ye. Khaustov, Ye. Ryzhov, L. Sakovych, Yu. A. Nastishin // Journal of Electronic Testing. Volumes 35, Issues 3 (148), June 2019, p.p. 349–357. – doi.org/10.1007/s10836-019-05798-9.

Received (Надійшла) 28.05.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.08.2020

Development of methodological errors assessment method calibration electric measuring devices of current rectangular wave from the «meander» type

V. Mosharenkov

Abstract. The aim of the article is to develop a method for estimating methodological errors in calibration of AC electrical measuring instruments with rectangular signals. This article deals with the applied aspects of estimation of methodological errors in calibration of alternating current electrical measuring instruments with rectangular «meander» signals for two typical types of instrument circuits, without compensation and with compensation. Mathematical models of calibration of electromagnetic measuring devices with signals of rectangular meander type and conditions of its equivalence to classical calibration of sine wave signals were obtained. It is shown that the introduction of a correction factor for the calibration of electromagnetic measuring devices with signals of rectangular shape of the type "meander" is possible provided that its amplitude is equal to the mean square value of the sinusoidal signal in the corresponding markings of the scale of the device. These models and equivalence conditions are also valid for electrodynamic ammeters and alternating current electrical measuring instruments. According to the results of the analysis, analytical expressions were obtained for the relative values of methodological errors in the measuring circuits of the device without compensation and with compensation. The results of the analysis confirmed the possibility of using rectangular waveforms of the "meander" type for calibration of electromagnetic devices. The developed method allows to estimate the methodological errors in calibration of alternating current electrical measuring instruments using rectangular signals. The results of the analysis give analytical expressions of the relative values of methodological errors in the measuring circuits of the device. The results of the analysis confirmed the possibility of using rectangular waveforms of the «meander» type for calibration of electromagnetic devices.

Keywords: rectangular signals, electromeasuring devices of alternating current, methodological error, calibration.