

УДК 681.2:621.3.072:621.317.725

В.В. Мошаренков

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ОЦІНКИ МЕТОДИЧНИХ ПОХИБОК ПОВІРКИ ЕЛЕКТРОВІМІРЮВАЛЬНИХ ПРИБАДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ КУСКОВО-СХІДЧАСТИМИ СИГНАЛАМИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ФОРМИ

Отримані конкретні оцінки методичних похибок при повірці різних електровимірювальних приладів змінного струму спеціальними сигналами з кусково-східчастої апроксимацією.

**Ключові слова:** електровимірювальні прилади змінного струму, повірка, передатна функція приладу, повірочний сигнал, методична похибка, сигнали спеціальної форми, вимірювальний ланцюг приладу.

### Вступ

**Постановка задачі.** Одним з напрямків подальшого вдосконалення метрологічного обслуговування (повірки і калібрування) електровимірювальних приладів змінного струму (ЕВПЗС) (амперметрів, вольтметрів і ватметрів) є дослідження можливостей застосування в якості повірочних (калібрувальних) сигналів замість традиційних сигналів “чисто” синусоїдальної форми сигналів несинусоїдальної форми, зокрема спеціальних. Це дозволить перейти до більш перспективних прецизійних цифрових калібраторів сигналів, заснованих на прямому цифроаналоговому синтезі високоточних сигналів заданої форми з допомогою сучасних високоточних цифроаналогових перетворювачів [1; 2].

**Аналіз літератури.** В зазначеному напрямку є роботи, в яких вирішуються окремі питання теоретичного і прикладного характеру повірки електровимірювальних приладів сигналами спеціальної форми. Найбільш системно і повно ці питання відображені в роботах авторів [3 – 6], а для кусково-східчастих сигналів спеціальної форми – в роботах [7; 8].

**Метою даної статті** є конкретизація оцінок методичних похибок повірки ЕВПЗС кусково-східчастими сигналами спеціальної форми. В ній детально аналізується процес повірки ЕВПЗС при повірочному кусково-східчастому сигналі трапецеїдальної форми, з якого в окремих випадках виходять прямокутний і трикутний кусково-східчасті повірочні сигнали.

### Основний матеріал

Вихідним співвідношенням для оцінки методичних похибок повірки ЕВПЗС сигналами спеціальної форми з кусково-східчастою апроксимацією є узагальнений вираз, який отримано авторами в статті [8]:

$$\Delta R(\tau_i) \leq \frac{N}{T} (\Delta u)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-) A_n}{P_n^2}, \quad (1)$$

де  $T$  – період кусково-східчастого сигналу  $u_c(t)$  спеціальної форми;

$N$  – кількість сходинок  $\Delta u_k$  напруги  $u_c(t)$  на період  $T$ ;

$\Delta u = \sqrt{(\Delta u_k)^2}$  – середньоквадратичне значення сходинок  $\Delta u_k$  напруги  $u_c(t)$ ;

$p_n$  – полюси передатної функції  $G(p)$  повіряемого ЕВПЗС;

$A_n$  – лишки в цих полюсах.

Як випливає з (1), для оцінки методичної похибки повірки кожного конкретного ЕВПЗС необхідно знати його передатну функцію  $G(p)$  і обчислити

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-) A_n}{p_n^2}.$$

Проведемо оцінку відносної методичної похибки повірки, яка визначається за формулою

$$\delta R = \frac{\Delta R}{U^2 G(0)},$$

або після підстановки співвідношення (1):

$$\delta R \leq \frac{N}{T} \left( \frac{\Delta u}{U} \right)^2 \frac{1}{G(0)} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-) A_n}{p_n^2} \right| = N \left( \frac{\Delta u}{U} \right)^2 Q, \quad (2)$$

де

$$Q = \frac{1}{T G(0)} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-) A_n}{p_n^2} \right|. \quad (3)$$

Обчислимо величину  $Q$  для різних видів повіряемых приладів.

#### 1. Повірка електромеханічних амперметрів та вольтметрів змінного струму

1.1. У вимірювальному ланцюзі приладу не передбачена компенсація індуктивності котушки.

Нехай вимірювальний ланцюг приладу має схему, наведену на рис. 1, а, де  $r$  – активний опір з можливим баластними (додатковим) опором,  $L$  – індуктивність котушки.

Запишемо вираз для операторної провідності

вимірювального ланцюга приладу:

$$Y(p) = \frac{1}{r + pL} = \frac{k}{p - p_0}, \quad (4)$$

де  $p_0 = -r/L$  – полюс з негативною дійсною частиною;

$k$  – числовий коефіцієнт.

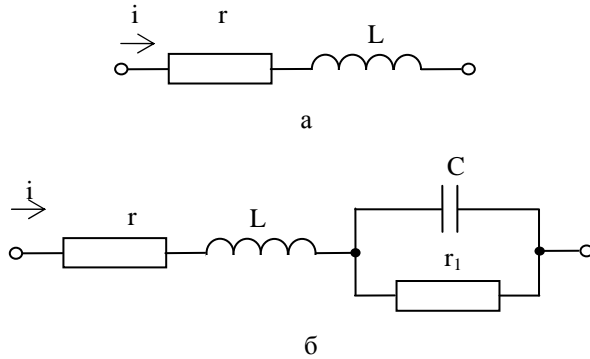


Рис. 1. Вимірювальний ланцюг приладу:  
а – без компенсації індуктивності котушки;  
б – з компенсацією індуктивності котушки

З використанням рівності (4) визначимо передатну функцію вимірювального ланцюга приладу:

$$G(p) = Y(p)Y(-p) = -\frac{k^2}{(p - p_0)(p + p_0)}. \quad (5)$$

Як видно з цього співвідношення, є єдиний полюс з негативною дійсною частиною, тому

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^n A_n}{P_n^2} = \frac{A_0}{P_0^2}, \quad (6)$$

де

$$A_0 = -k^2 / (2p_0). \quad (7)$$

З формули (5) знаходимо

$$A_0 = -k^2 / (2p_0). \quad (8)$$

Підставляючи рівняння (6) з урахуванням (7) і (8) у вираз (3), отримаємо

$$Q = \frac{1}{2T |p_0|} = \frac{1}{4\pi |p_0|} = \frac{1}{4\pi} \frac{\omega L}{r}.$$

Тоді формула (2) приймає вигляд

$$\delta R = \frac{N}{4\pi} \left( \frac{\Delta u}{U} \right)^2 \frac{\omega L}{r}, \quad (9)$$

звідки знаходимо

$$\delta I = \frac{N}{8\pi} \left( \frac{\Delta u}{U} \right)^2 \frac{\omega L}{r}. \quad (10)$$

Зокрема, для повірочного сигналу прямокутної форми типу меандр, який має на інтервалі  $(0, T)$  два стрибки величиною  $U$  кожен, так що  $\Delta u = 2U$ , з формули (9) знаходимо

$$\delta I = \frac{2}{8\pi} \left( \frac{2U}{U} \right)^2 \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{\pi} \frac{\omega L}{r},$$

що збігається з відомим результатом, отриманим з [6; 9].

1.2. У вимірювальному ланцюгу приладу передбачена компенсація індуктивності (рис. 1, б).

Запишемо вираз для операторного опору  $Z(p)$  вимірювального ланцюга ЕВПЗС з урахуванням можливого послідовно включеного баластного (додакового) опору  $r_0$ :

$$Z(p) = r_0 + r + pL + \frac{r_1}{1 + p r_1 C}. \quad (11)$$

Введемо наступні позначення:

$$\alpha = r_1 C \omega; \quad \gamma = \frac{\omega L}{r}; \quad r_2 = r_0 + r + r_1.$$

Враховуючи наведені позначення та приймаючи до уваги умову компенсації індуктивності, з (11) получимо вираз для передатної функції приладу  $G(p)$ :

$$G(p) = k \frac{(p - q)(p + q)}{(p - p_1)(p - p_2)(p + p_1)(p + p_2)} = Y(p)Y(-p). \quad (12)$$

Визначивши полюса  $p_1, p_2$  та лишки  $A_1, A_2$  цієї функції, отримаємо

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^n A_n}{P_n^2} = -\frac{k}{2p_1 p_2 (p_1 + p_2)} \left[ 1 - q^2 \frac{(p_1 + p_2)^2}{p_1^2 p_2^2} + \frac{q^2}{p_1 p_2} \right]. \quad (13)$$

Знаходимо величину  $G(0)$  з виразу (12):

$$G(0) = -k \frac{q^2}{p_1^2 p_2^2}.$$

З урахуванням цього співвідношення формулу (13) приведемо до вигляду

$$G(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^n A_n}{P_n^2} = \frac{p_1 p_2}{2q^2 (p_1 + p_2)} \left[ 1 - q^2 \frac{(p_1 + p_2)^2}{p_1^2 p_2^2} + \frac{q^2}{p_1 p_2} \right].$$

Підставимо цей вираз у формулу (3) і після перетворень з точністю до величин другого порядку малості маємо

$$Q = \frac{1}{4\pi} \gamma = \frac{1}{4\pi} \frac{\omega L}{r},$$

тобто ту саму формулу, що і в попередньому випадку. Це означає, що будуть справедливі такі самі вирази для відносних похибок  $\delta R$  і  $\delta I$  – відповідно (9) і (10).

## 2. Повірка електродинамічних ватметрів

В електродинамічних ватметрах компенсація передбачена тільки в ланцюзі напруги (рис. 2).

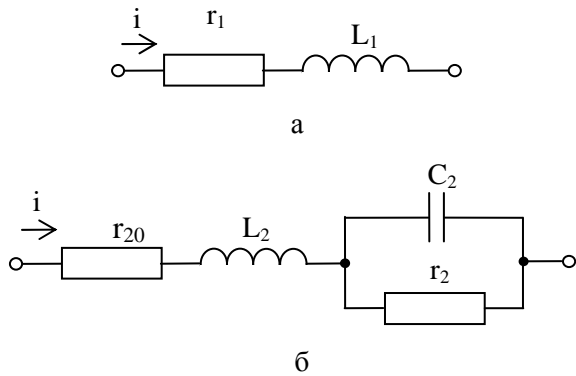


Рис. 2. Схеми вимірювальних ланцюгів ватметра: а – струму, б – напруги

Якщо операторну провідність в ланцюзі напруги позначити через  $Y_1(p)$ , а операторну провідність в ланцюзі струму – через  $Y_2(p)$ , то для передатної функції приладу маємо

$$G(p) = Y_1(p)Y_2(-p) = k \frac{(p-q)}{(p-p_1)(p-p_2)(p+p_0)}, \quad (14)$$

де тільки полюса  $p_1$  і  $p_2$  мають негативну дійсну частину, а полюс  $p = -p_0$  – позитивну дійсну частину, причому  $p_0 = -r_1/L_1$ .

Використовуючи формулу(14), знаходимо аналогічно попередньому

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-)^n \frac{A_n}{P_n^2} = -k \left( \frac{[p_1 p_2 (p_1 + p_2) - q(p_1 + p_2)^2 + q p_1 p_2]}{p_1^2 p_2^2 [p_1 p_2 + p_0 (p_1 + p_2) + p_0^2]} + \frac{p_0 p_1 p_2 - q p_0 (p_1 + p_2)}{p_1^2 p_2^2 [p_1 p_2 + p_0 (p_1 + p_2) + p_0^2]} \right), \quad (15)$$

а потім

$$G(0) = -kq/(p_1 p_2 p_0). \quad (16)$$

Враховуючи співвідношення (15) і (16), з формули (3) отримаємо

$$Q = \frac{|p_0| \alpha \gamma}{T \omega^2} \frac{\left| 1 - \frac{p_0}{\omega} \alpha^2 \gamma \right|}{1 - \frac{p_0}{\omega} \alpha + \frac{p_0^2 \alpha \gamma}{\omega^2}}.$$

Введемо позначення  $\xi = \frac{\omega}{|p_0|} = \frac{\omega L_1}{r_1} \ll 1$ , тоді

$$Q = \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha \gamma}{\xi} \frac{\left( 1 + \frac{\alpha^2 \gamma}{\xi} \right)}{1 + \frac{\alpha}{\xi} + \frac{\alpha \gamma}{\xi^2}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha \gamma (\xi + \alpha^2 \gamma)}{\xi^2 + \alpha \xi + \alpha \gamma}. \quad (17)$$

Звідси видно, що величина  $Q$  має перший порядок малості, оскільки в чисельнику величина 3-го порядку малості, а в знаменнику – 2-го порядку малості.

Використовуючи рівність (17), з формули (2) знаходимо відносну похибку повірки у визначенні кореляційної функції

$$\delta R = \frac{N}{2\pi} \left( \frac{\Delta u}{U} \right)^2 \frac{\alpha \gamma (\xi + \alpha^2 \gamma)}{\xi^2 + \alpha \xi + \alpha \gamma}.$$

Якщо виконується умова  $\xi \gg \alpha^2 \gamma$ , що звичайно має місце, то

$$\delta R = \frac{N}{2\pi} \left( \frac{\Delta u}{U} \right)^2 \frac{\alpha \gamma \xi}{\xi^2 + \alpha \xi + \alpha \gamma} = \frac{N}{2\pi} \left( \frac{\Delta u}{U} \right)^2 \frac{1}{\frac{1}{\xi} + \frac{1}{\gamma} + \frac{\xi}{\alpha \gamma}}.$$

На закінчення нагадаємо, що всі дослідження виконані за умови, коли інтервал дискретизації  $\Delta t \gg \tau$ , де  $\tau$  – постійна часу приладу, тобто за

умови  $N \ll 1/(\omega\tau)$ . Роль величини  $\omega\tau$  виконує найбільша з величин  $\alpha, \gamma, \xi$ . У протилежному випадку ( $N \gg 1/(\omega\tau)$ ) похибка буде мати не перший, а другий порядок малості за величиною  $1/(\omega\tau)$  і цей випадок розглянутий в [6; 9]. За граничними умовами ( $N \sim 1/(\omega\tau)$ ) нинішнє і проведені раніше дослідження дають, очевидно, однакову оцінку похибки, так як  $\omega\tau/N$  в цьому випадку дорівнює  $(\omega\tau)^2$ .

## Висновок

З використанням отриманих авторами раніше узагальненої математичної моделі ЕВПЗС та узагальненого виразу для оцінки методичної похибки повірки ЕВПЗС кусково-східчастими сигналами спеціальної форми (прямокутної, трикутної та трапецеїдальної) наведено оцінки методичної похибки повірки для конкретних видів ЕВПЗС – амперметрів, вольтметрів і ватметрів, які підтвердили практичну можливість повірки та калібрування зазначених ЕВПЗС сигналами, більш близькими до реальних ніж модель синусоїдального сигналу яка використовується на цей час, що дозволяє підвищити достовірність повірки і калібрування ЕВПЗС.

## Список літератури

1. Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов / В.П. Дьяконов. – М: ДМК Пресс, 2009. – 384 с.
2. Современные функциональные генераторы за рубежом: Экспресс-информация. – М.: ИНФОРМ ПРИБОР, – сер. ТС-5. – 1988. – 13 с.
3. Чинков В.Н. Обобщенная математическая модель электроизмерительных приборов при входных периодических сигналах сложной формы / В.Н. Чинков, В.В. Мошаренков // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2011. – Вып. 3(29). – С. 221-223.

4. Чинков В.Н. Частные математические модели электроизмерительных приборов переменного тока для входных сигналов специальной формы / В.Н. Чинков, В.В. Мошаренков // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 1(30). – С. 175-178.

5. Чинков В.Н. Обобщенное выражение для оценивания методической погрешности поверки электроизмерительных приборов переменного тока сигналами сложной формы / В.Н. Чинков, В.В. Мошаренков // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 2(31). – С. 131-134.

6. Чинков В.Н. Оценки методических погрешностей при поверке электромеханических измерительных приборов сигналами специальной формы / В.Н. Чинков, В.В. Мошаренков // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 3(36). – С. 199-202.

7. Чинков В.М. Узагальнена математична модель електровимірювальних приладів при входних періодичних кусково-східчастих сигналах складної форми / В.М. Чин-

ков, В.В. Мошаренков // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 1(117). – С. 72-74.

8. Чинков В.М. Узагальнений вираз для оцінки методичної похибки повірки електровимірювальних приладів змінного струму кусково-східчастими сигналами складної форми / В.М. Чинков, В.В. Мошаренков // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 2(118). – С. 76-79.

9. Чинков В.Н. Методы поверки электроизмерительных приборов переменного тока аналоговыми сигналами специальной формы / В.Н. Чинков, В.В. Мошаренков // Український метрологічний журнал. – 2012. – № 2. – С. 10-16.

Надійшла до редколегії 22.09.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. наук. співробітник С.В. Герасимов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

#### ОЦЕНКИ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОВЕРКИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА КУСОЧНО-СТУПЕНЧАТЫМИ СИГНАЛАМИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ

В.В. Мошаренков

Получены оценки методических погрешностей при поверке различных электроизмерительных приборов переменного тока специальными сигналами с кусочно-ступенчатой аппроксимацией.

**Ключевые слова:** электроизмерительные приборы переменного тока, поверка, передаточная функция прибор, поверочный сигнал, методическая погрешность, сигналы специальной формы, измерительная цепь прибора.

#### ASSESSMENT OF METHODOLOGICAL ERRORS VERIFICATION ELECTRIC MEASURING DEVICES OF ACCURRENT PIECEWISE-SPEED SIGNALS SPECIAL FORM

V.V. Mosharenkov

Estimates are obtained of methodological errors when testing various electric measuring devices of AC special signals with piecewise-speed approximation.

**Keywords:** electric measuring devices of AC, verification, the transfer function of the instrument, calibration signal, methodical error, signals of a special form, measuring circuit of the device.