

УДК 681.2:621.3.072:621.317.725

В.М. Чинков, В.В. Мошаренков

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

УЗАГАЛЬНЕНИЙ ВИРАЗ ДЛЯ ОЦІНКИ МЕТОДИЧНОЇ ПОХИБКИ ПОВІРКИ ЕЛЕКТРОВІМІРЮВАЛЬНИХ ПРИБЛАДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ КУСКОВО-СХІДЧАСТИМИ СИГНАЛАМИ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

Отримано узагальнений вираз для оцінки методичної похибки повірки електровимірювальних приладів змінного струму кусково-східчастими сигналами спеціальної форми.

Ключові слова: сигнали спеціальної форми, електровимірювальні прилади змінного струму, повірка, методична похибка.

Вступ

Постановка задачі. Одним з напрямків подальшого вдосконалення метрологічного обслуговування (повірки і калібрування) електровимірювальних приладів змінного струму (ЕВПЗС) є перехід від строго синусоїдальної форми повірочного (калібрувального) сигналу до багаточастотних аналогових сигналів складної форми [1 – 6], зокрема, спеціальної (прямокутної, трикутної, трапецеїдальної форми), що відтворюються генератором типу ГЗ-36. Наступним перспективним кроком у цьому напрямку може стати перехід від аналогових складних сигналів до кусково-східчастих, тобто з кусково-східчастої апроксимацією [7], потенційна точність відтворення яких значно вища за рахунок високоточних цифроаналогових перетворювачів. При цьому, природно, має місце методична похибка повірки або калібрування ЕВПЗС.

Аналіз літератури. На основі проведеного аналізу відомої літератури видно, що найбільш повно оцінки методичної похибки повірки ЕВПЗС проведені для одного з видів спеціальних сигналів [2, 4]. У [8] знайдено узагальнений вираз для оцінки методичної похибки повірки ЕВПЗС аналоговими сигналами складної форми, а в [9, 10] такі оцінки отримані для найбільш розповсюджених спеціальних аналогових сигналів прямокутної, трикутної та трапецеїдальної форми.

Метою даної статті є отримання узагальненого виразу для оцінки методичної похибки повірки ЕВПЗС кусково-східчастими сигналами складної форми.

Основний матеріал

Вихідними для вирішення поставленої задачі є наступні співвідношення [7]:

– для імпульсної перехідної характеристики ЕВПЗС:

$$g_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{p_n^2} \frac{e^{p_n t}}{1 - e^{p_n T}}, \quad 0 < t < T, \quad (1)$$

де p_n – полюси передатної функції ЕВПЗС

$$G(p) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{p - p_n}; \quad A_n \text{ – лишки в цих полюсах;}$$

– для кореляційної функції напруг у вимірювальних ланцюгах ЕВПЗС:

$$R_0(\tau) = -\frac{1}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u_k u_c(\tau + t_k), \quad (2)$$

де

$$u_c(\tau + t_k) = \int_0^T u_c(t) \delta(t - \tau - t_k) dt,$$

а підсумовування по k здійснюється по всіх стрибках функції $u_c(t)$ на інтервалі періодичності $(0, T)$;

– для кореляційної функції струмів у вимірювальних ланцюгах ЕВПЗС:

$$R(\tau) = G(0)R_0(\tau) - \frac{G'(0)}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u_k u_c(\tau + t_k) - \frac{1}{T} \sum_{k,l=1}^{\infty} \Delta u_k \Delta u_l g_1(\tau + t_l - t_k). \quad (3)$$

Узагальнений вираз для оцінки методичної похибки повірки ЕВПЗС періодичним кусково-східчастим сигналом $u_c(t)$ приймаючи за умови, коли постійна часу вимірювального ланцюга приладу мала в порівнянні з тимчасовим інтервалом між сусідніми сходинками $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ (рис. 1).

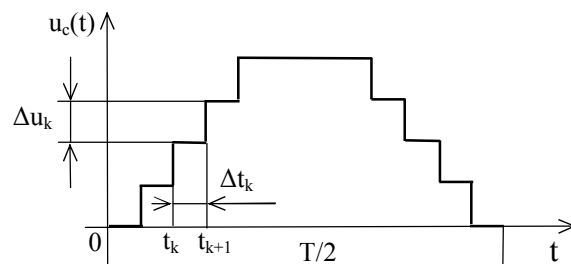


Рис. 1. Півперіод повірочного сигналу

Математично ця умова означає, що для всіх полюсів передатної функції ЕВПЗС $G(p)$ виконуються нерівність

$$|p_n| \Delta t_k \gg 1,$$

яку можна записати і так:

$$\frac{|p_n|}{\omega} \omega \Delta t_k \gg 1,$$

тобто

$$\frac{2\pi|p_n|}{\omega} \cdot \frac{1}{N} \gg 1,$$

де $N = T/\Delta t_k$ – кількість сходинок на період сигналу.

Таким чином, повинна виконуватися нерівність

$$N \ll \frac{2\pi|p_n|}{\omega} \sim \frac{1}{\varepsilon}.$$

Оскільки зазвичай $\varepsilon \leq 10^{-3}$, то це є цілком реальна умова.

Зауважимо, що за протилежної умови, коли сходинки сигналу $u_c(t)$ настільки малі, що часовий інтервал Δt_k між ними набагато менший постійної часу приладу, в його електричних колах відбувається усереднення або згладжування сходинок.

Прилад стає нечутливим до сходинок, так що їх наявність у повірочному сигналі не призводить до похибки повірки.

Для аналізу похибки повірки за умови

$$p_n \Delta t \gg 1$$

звернемося до виду функції $g_1(t)$.

Для компактності записів представимо формулу (1) для цієї функції у вигляді

$$g_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{p_n^2} s_n(t), \quad (4)$$

де

$$s_n(t) = \frac{e^{p_n t}}{1 - e^{p_n T}}. \quad (5)$$

Оскільки всі полюси p_n великі, то при $\text{Re } p_n < 0$ функція $s_n(t)$ являє собою вузький пік поблизу точки $t = 0$ (рис. 2, а) шириною приблизно

$$\Delta t \sim \frac{1}{|\text{Re } p_n|}.$$

При $\text{Re } p_n > 0$ функція $s_n(t)$ також являє собою вузький пік (рис. 2, б), але при $t = T$, і $t = T$ визначається виразом

$$s_n(t) = \frac{e^{p_n T} e^{p_n(t-T)}}{1 - e^{p_n T}} \sim -e^{p_n(t-T)}.$$

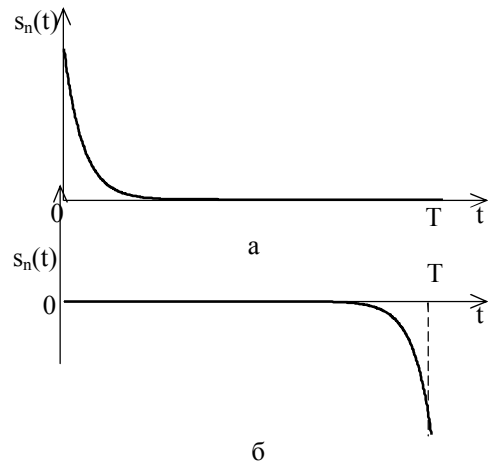


Рис. 2. Графік функції $s_n(t)$: а – при $\text{Re } p_n < 0$; б – при $\text{Re } p_n > 0$

Таким чином, з аналізу функції $s_n(t)$ випливає, що функція $g_1(t)$ відповідно до виразу (4) відмінна від нуля тільки поблизу точок $t = 0$ та $t = T$.

Всі дослідження функції $g_1(t)$ слід проводити не на інтервалі періодичності $(0, T)$, а на інтервалі періодичності $(-T/2, T/2)$, так як на цьому інтервалі вона має вузький пік у точці $\tau = 0$. При $t < 0$ функції $g_1(t)$ і $s_n(t)$ отримують періодичним продовженням.

Обчислимо третій доданок у формулі (10), яка має фізичний сенс похибки.

Введемо позначення

$$\Delta R_2(\tau) = -\frac{1}{T} \sum_{k,l=1}^{\infty} \Delta u_k \Delta u_l g_1(\tau + t_l - t_k). \quad (6)$$

Як зрозуміло з попереднього, величина $\Delta R_2(\tau)$ відмінна від нуля тільки в малій околі точок $\tau_i = t_l - t_k$ на інтервалі $(-T/2, T/2)$. Ці точки можна отримати так: побудувати різниці $t_l - t_k$ у порядку зростання і нанести їх на тимчасову вісь. Зокрема, при рівномірному розбитті (рівномірній дискретизації) такими точками будуть наступні моменти часу: $\tau_i = 0, \pm \Delta t, \pm 2\Delta t, \dots$ ($\Delta t = T/N$). Праворуч від будь-якої такої точки τ_i для величини $\Delta R_2(\tau_i + 0)$ з виразу (6) знаходимо

$$\Delta R_2(\tau_i + 0) = -\frac{1}{T} g_1(+0) \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u_k \Delta u_{k+i}, \quad (7)$$

а ліворуч від точки τ_i для величини $\Delta R_2(\tau_i - 0)$ маємо

$$\Delta R_2(\tau_i - 0) = \frac{1}{T} g_1(-0) \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u_k \Delta u_{k+i}. \quad (8)$$

Виходячи з цього, найбільше значення величини ΔR_2 виходить при $\tau_i = 0$, $i = 0$.

Абсолютна методична похибка перевірки у визначенні величини $R(\tau)$ дорівнює

$$\Delta R = R(\tau) - |G_1| R_0(\tau + \psi/\omega), \quad (9)$$

де $G_1 = |G_1| e^{j\psi_1} = G(j\omega)$ – комплексна передатна функція ЕВПЗС на робочій частоті.

З точністю до малої величин порядку $0(\varepsilon)$ після розкладання функції $R_0(\tau + \psi/\omega)$ у степеневий ряд до першого (лінійного) члена вираз (9) перетворюємо до остаточного вигляду:

$$\Delta R = \Delta R_1 + \Delta R_2, \quad (10)$$

$$\Delta R_1 = G'(0) [R'_0(\tau) - R'_0(\tau + M)], \quad (11)$$

де $M = \zeta \frac{G'(0)}{G(0)}$.

Використовуючи формулу (2) для $R'_0(\tau)$, знаходимо

$$R'_0(\tau) - R'_0(\tau + M) = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u_k [u_c(\tau + M + t_k) - u_c(\tau + t_k)]. \quad (12)$$

Величина $[u_c(\tau + M + t_k) - u_c(\tau + t_k)]$ відмінна від нуля тільки в ε -околі точок τ_i , де вона дорівнює Δu_{k+i} .

Іншими словами кажучи, функція $R'_0(\tau)$ неперервна всюди, крім точок τ_i , а функція $R_0(\tau)$ має в точках τ_i зломи.

Підставляючи рівняння (12) в (9), отримаємо

$$\Delta R_1(\tau_i - 0) = \frac{G'(0)}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u_k \Delta u_{k+i}; \quad (13)$$

$$\Delta R_1(\tau_i + 0) = 0, \quad M > 0. \quad (14)$$

Умову $M > 0$ завжди можливо виконати відповідним вибором операторних провідностей вимірвальних ланцюгів приладу.

Приймаючи до уваги співвідношення (7), (8) для ΔR_2 і (13), (14) для ΔR_1 , з формули (10) для абсолютної похибки перевірки запишемо

$$\Delta R(\tau_i + 0) = -\frac{g_1(+0)}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u_k \Delta u_{k+i}; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta R(\tau_i - 0) &= \\ &= [G'(0) - g_1(-0)] \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u_k \Delta u_{k+i}, \end{aligned} \quad (16)$$

де

$$g_1(+0) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{p_n^2} \frac{1}{1 - e^{p_n T}}; \quad (17)$$

$$g_1(-0) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{p_n^2} \frac{e^{p_n T}}{1 - e^{p_n T}}; \quad (18)$$

$$G'(0) = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{p_n}. \quad (19)$$

Рівності (17), (18) вірні з точністю до експоненціально малих членів.

Зазначимо, що у співвідношеннях (17) і (18) справедливі наступні рівності:

$$\frac{1}{1 - e^{p_n T}} = \begin{cases} 1, & \text{Re } p_n < 0 \\ 0, & \text{Re } p_n > 0 \end{cases} + 0(e^{-|p_n|T}); \quad (20)$$

$$\frac{e^{p_n T}}{1 - e^{p_n T}} = \begin{cases} 0, & \text{Re } p_n < 0 \\ -1, & \text{Re } p_n > 0 \end{cases} + 0(e^{-|p_n|T}). \quad (21)$$

З урахуванням цих рівностей формули (17) і (18) приймають спрощений вигляд:

$$g_1(+0) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-) A_n}{p_n^2}; \quad (22)$$

$$g_1(-0) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(+) A_n}{p_n^2}. \quad (23)$$

Зазначимо, що у співвідношенні (22) підсумовування ведеться тільки по полюсах з негативною дійсною частиною, а в співвідношенні (23) – тільки по полюсах з позитивною матеріальною частиною, що підкреслено знаками $(-)$ і $(+)$ – в сумах.

Обчислимо величину $[G'(0) - g_1(-0)]$ у формулі (16). З урахуванням рівностей (19) і (18), а потім (17) отримуємо

$$\begin{aligned} G'(0) - g_1(-0) &= \\ &= -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{p_n^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(+) A_n}{p_n^2} = \\ &= -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-) A_n}{p_n^2} = -g_1(+0). \end{aligned} \quad (24)$$

Підставимо $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-) A_n}{p_n^2}$ з формули (24) у вираз (16), маємо

$$\begin{aligned} \Delta R(\tau_i - 0) &= \\ &= -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-) A_n}{p_n^2} \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u_k \Delta u_{k+i}. \end{aligned} \quad (25)$$

З формул (15) і (25) випливає, що в точках τ_i функція неперервна, так що після перетворень знаходимо

$$\Delta R(\tau_i) = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-) A_n}{p_n^2} \rho_i, \quad (26)$$

де

$\rho_i = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u_k \Delta u_{k+i}$ – дискретна згортка величини

Δu_k (або дискретна автокореляційна функція).

Тому

$$\begin{aligned} |\rho_i| &\leq \rho_0 = \\ &= \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{\infty} (\Delta u_k)^2 = \frac{N}{T} \overline{\Delta u_k^2} = \frac{N}{T} (\Delta u)^2, \end{aligned} \quad (27)$$

де $\Delta u = \sqrt{\overline{\Delta u_k^2}}$ – середньоквадратичне значення сходинок Δu_k напруги $u_c(t)$; N – кількість сходинок на період сигналу.

Отже, з урахуванням нерівності (27) формула (26) приходить до виду

$$\Delta R(\tau_i) \leq \frac{N}{T} (\Delta u)^2 \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-)^n \frac{A_n}{P_n^2} \right|. \quad (28)$$

Висновок

Отримано вираз (28), який є узагальненням і з його використанням можуть бути проведені оцінки методичних похибок перевірки конкретних видів ЕВПЗС кусково-східчастими сигналами спеціальної форми.

Список літератури

1. Туз Ю.М. Источник калибровочного напряжения / Ю.М. Туз, Ю.С. Есиков // Измерительная техника. – 1973. – №9. – С. 42-44.
2. 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.
3. 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.

4. Чинков В.Н. Теоретические основы электромеханических измерительных приборов переменного тока сигналами прямоугольной формы / В.Н. Чинков, А.А. Каревик // Украинський метрологічний журнал. – 2002. – №2. – С. 58-61.

5. 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. Теоретические основы калибровки электромеханических измерительных приборов переменного тока сигналами прямоугольной формы / В.Н. Чинков, А.А. Каревик // Украинський метрологічний журнал. – 2002. – №2. – С. 58-61.

7. Чинков В.М. Узагальнена математична модель електровимірних приладів при вхідних періодичних кусково-східчастих сигналах складної форми / В.М. Чинков, В.В. Мошаренков // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 1(117). – С. 72-74.

8. Чинков В.Н. Обобщенная математическая модель электроизмерительных приборов при входных периодических сигналах сложной формы / В.Н. Чинков, В.В. Мошаренков // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 3(29). – С. 221-223.

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

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

Надійшла до редколегії 7.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.

ОБОБЩЕННОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПОВЕРКИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА КУСОЧНО-СТУПЕНЧАТЫМИ СИГНАЛАМИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В.Н. Чинков, В.В. Мошаренков

Получено обобщенное выражение для оценки методической погрешности поверки электроизмерительных приборов переменного тока кусочно-ступенчатыми сигналами специальной формы.

Ключевые слова: сигналы специальной формы, электроизмерительные приборы переменного тока, поверка, методическая погрешность.

GENERALIZED EXPRESSION FOR EVALUATION OF METHODOLOGICAL ERROR OF CHECK OF ELECTROMEASURING DEVICES OF ALTERNATING CURRENT BY SIGNALS OF DIFFICULT FORM

V.N. Chinkov, V.V. Mosharenkov

The generalized is got expression for the evaluation of methodical error of check of electromeasuring devices of alternating current by the analog test special signals of different form.

Keywords: signals of nospread function, electromeasuring devices of alternating current, check, methodical error.