

УДК 681.2:621.3.072:621.317.725

В.Н. Чинков, В.В. Мошаренков

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ОЦЕНКИ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ПОВЕРКЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СИГНАЛАМИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ

*Получены оценки методических погрешностей при поверке электромеханических измерительных приборов сигналами специальной формы.*

**Ключевые слова:** сигналы специальной формы, электромеханические измерительные приборы переменного тока, поверка, методическая погрешность.

### Введение

**Постановка задачи.** Одним из направлений дальнейшего совершенствования метрологического обслуживания (поверки и калибровки) электромеханических измерительных приборов переменного тока (ЭМИППТ) (амперметров, вольтметров и ваттметров) является исследование возможностей применения в качестве поверочных (калибровочных) сигналов не только традиционных сигналов “чисто” синусоидальной формы, но и сигналов несинусоидальной формы, в частности специальных. Это позволит перейти к более перспективным цифровым калибраторам, основанным на прямом цифроаналоговом синтезе высокоточных сигналов заданной формы с помощью современных цифроаналоговых преобразователей [1, 2].

**Анализ литературы.** В указанном направлении имеются работы, в которых решаются отдельные вопросы теоретического и прикладного характера поверки электроизмерительных приборов сигналами специальной формы. Наиболее системно и полно эти вопросы отражены в работах авторов [3–5], где предложены обобщенная и частные математические модели, а также обобщенное выражение для оценивания методических погрешностей такой поверки.

**Целью данной статьи является** конкретизация оценок методических погрешностей поверки ЭМИППТ. В ней детально анализируется процесс поверки ЭМИППТ при поверочном сигнале трапецеидальной формы, из которого в частных случаях получают прямоугольный и треугольный поверочные сигналы.

### Основной материал

Как показано в [5], абсолютная методическая погрешность поверки ЭМИППТ  $\Delta_M$ , в том числе ЭМИППТ, определяется отличием их математических моделей (или корреляционных функций) поверочных сигналов синусоидальной формы

$$R_{0s}(\tau) = U_s^2 |G(j\omega)| \quad (1)$$

и несинусоидальной (специальной) формы:

$$R(\tau) = U^2 |G(j\omega)| (1 + \Delta_f), \quad (2)$$

где  $G(j\omega) \equiv G_1 = |G(j\omega)| e^{j\psi(j\omega)}$  – амплитудно-фазовая характеристика или частотная (комплексная) передаточная функция поверяемого прибора;

$U_s, U$  – средние квадратические значения (СКЗ) напряжений синусоидальной и несинусоидальной (специальной) формы:

$$\Delta_f = \frac{1}{2} \omega^2 \left[ \ln G(p) \right]' \Big|_{p=0} v(\omega\tau), \quad (3)$$

причем

$$v(\omega\tau) = f''(\omega\tau) + f(\omega\tau), \quad (4)$$

а

$$f(\varphi) = \begin{cases} 1 - a\varphi^2 + b\varphi^3, & 0 < \varphi < \varphi_0 = \pi - 2\beta; \\ 1 - a\varphi^2 + b[\varphi^3 + (\varphi - \varphi_0)^3], & \varphi_0 < \varphi < \frac{\pi}{2}; \end{cases} \quad \beta > \frac{\pi}{4}; \quad (5)$$

$$f(\varphi) = \begin{cases} 1 - a\varphi^2 + b\varphi^3, & 0 < \varphi < 2\beta; \\ 1 - a\varphi^2 + b[\varphi^3 + (\varphi - 2\beta)^3], & 2\beta < \varphi < \frac{\pi}{2}; \end{cases} \quad \beta < \frac{\pi}{4}, \quad (6)$$

где  $\varphi = \omega\tau, \varphi_0 = \omega\tau_0$ ;

$$\beta = \omega\theta = 2\pi\theta/T;$$

$$a = \frac{1}{\pi\beta \left(1 - \frac{4}{3\pi}\beta\right)}; \quad b = \frac{1}{6\pi\beta^2 \left(1 - \frac{4}{3\pi}\beta\right)}. \quad (7)$$

Если при поверке ЭМИППТ обеспечить равенство СКЗ напряжений  $U = U_s$ , то, принимая во внимание, что измеряемое значение напряжения равно  $\sqrt{R(\tau)}$ , для абсолютной методической погрешности поверки имеем

$$\Delta_M(\sqrt{R(\tau)}) = \sqrt{R(\tau)} - \sqrt{R_s(\tau)} = U \sqrt{|G(j\omega)|} (\sqrt{1 + \Delta_f} - 1).$$

Применяя разложение в степенной ряд до линейного члена  $\sqrt{1 + \Delta_f} = 1 + \frac{1}{2} \Delta_f$ , для абсолютной методической погрешности поверки находим

$$\Delta_M(\sqrt{R(\tau)}) = \frac{1}{2} U \sqrt{|G(j\omega)|} \Delta_f, \quad (8)$$

а для относительной погрешности, принимая  $\Delta_f \ll 1$ ,

$$\delta_M = \frac{\Delta_M(\sqrt{R(\tau)})}{\sqrt{R(\tau)}} = \frac{1}{2} \Delta_f. \quad (9)$$

Значение методической погрешности  $\Delta_f$ , как видно из формул (3) и (4), зависит, во-первых, от формы поверочного сигнала посредством величины  $[f''(\omega\tau) + f(\omega\tau)]_{\tau=0}$  и, во-вторых, от реактивных элементов измерительных цепей прибора. Исследуем обе эти составляющие.

Для оценки влияния формы поверочного сигнала на методическую погрешность поверки, используя (5) или (6), определим величину  $v(\omega\tau)$  из равенства (4):

$$v = 1 - \frac{2}{\pi\beta \left(1 - \frac{4}{3\pi}\beta\right)}, \quad 0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

Найдем то значение  $\beta$ , которое обеспечивает минимальное значение величины  $v$ , а значит, и составляющей методической погрешности поверки, обусловленной формой поверочного сигнала. Имеем  $\beta = 3\pi/8$ . Это значение  $\beta$  соответствует наименьшему по модулю значению величины  $v$ , которое вычислим из (10):

$$v|_{\beta=3\pi/8} = 1 - \frac{32}{3\pi^2} = -0,080. \quad (11)$$

Для треугольного поверочного сигнала  $\beta = \frac{\pi}{2}$  и величина  $v$  равна

$$v|_{\beta=\pi/2} = 1 - \frac{12}{\pi^2} = -0,216. \quad (12)$$

Для поверочного сигнала в виде трапеции с исключенной третьей гармоникой  $\beta = \pi/3$  и величина  $v$  равна

$$v|_{\beta=\pi/3} = 1 - \frac{54}{5\pi^2} = -0,094. \quad (13)$$

Переходим к оценке второй составляющей методической погрешности поверки, вызываемой реактивными элементами измерительных цепей электромеханических амперметров и вольтметров.

При этом возможны два варианта таких цепей [6, 7]:

- без частотной компенсации индуктивности катушки;
- с частотной компенсацией индуктивности катушки.

В ЭИППТ, в которых не предусмотрена частотная компенсация, измерительная цепь состоит из последовательно включенного активного сопротивления  $r$  (с учетом балластного сопротивления, если оно есть) и индуктивности  $L$  (рис. 1, а), так что операторная проводимость  $Y(p)$  прибора имеет единственный полюс  $p_1 = -r_1/L_1$ , а передаточная функция  $G(p)$  – два полюса:

$$p_1 = -r_1/L_1 \text{ и } p_2 = r_1/L_1.$$

Нулей функция  $G(p)$  не имеет. Поэтому

$$[\ln G(p)]'' \Big|_{p=0} = 2 \left( \frac{L_1}{r_1} \right)^2 = 2\tau_1^2,$$

где  $\tau = L_1/r_1$  – постоянная времени измерительной цепи прибора.

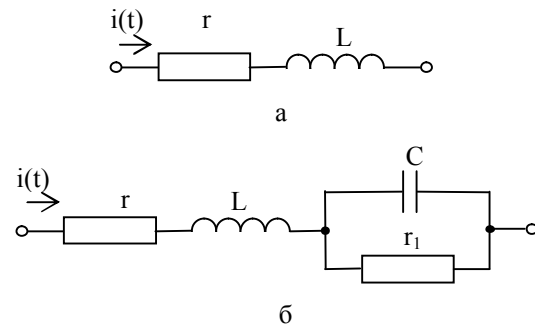


Рис. 1 Схемы измерительных цепей прибора  
а – без частотной компенсации индуктивности катушки;  
б – с частотной компенсацией индуктивности катушки

Тогда из соотношения (3) имеем

$$\Delta_f = v \left( \frac{\omega L_1}{r_1} \right)^2,$$

а из формулы (9)

$$\delta_M = \frac{1}{2} v \left( \frac{\omega L_1}{r_1} \right)^2 = \frac{1}{2} v (\omega\tau_1)^2, \quad (14)$$

где величина  $v$  определяется выражением (10), а для некоторых форм поверочного сигнала вычислена в равенствах (11), (12) и (13).

Частотная компенсация индуктивности измерительной цепи прибора выполняется по схеме на рис. 1, б.

Для такой схемы прибора аналогично предыдущему для абсолютной методической погрешности поверки  $\Delta_f$  находим

$$\Delta_f = -2\omega^2 \frac{rL_2C_2}{r_\Sigma} v,$$

где  $r_\Sigma = r + r_1$ ,

а для относительной погрешности имеем

$$\delta_1 = -\omega^2 \frac{rL_2C_2}{R} v, \quad (15)$$

где величина  $v$  для различных форм поверочных сигналов, т.е. разных значений  $\beta$ , определяется равенствами (11), (12) и (13).

У электродинамических (и ферродинамических) ваттметров последовательная измерительная цепь (цепь тока) содержит только активное сопротивление и индуктивность (рис. 2,а), а параллельная измерительная цепь (цепь напряжения) выполнена по схеме с частотной компенсацией (рис. 2,б).

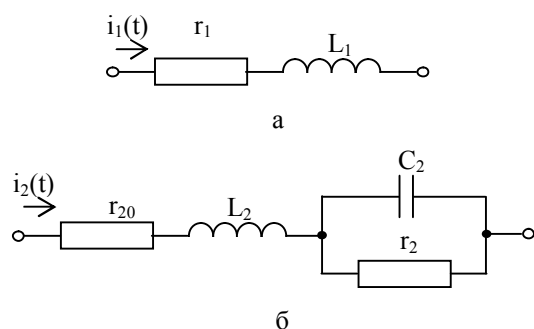


Рис. 2 Схемы измерительных цепей электродинамического ваттметра:  
а – последовательной;  
б – параллельной

Эти измерительные цепи аналогичны рассмотренным выше, поэтому для них справедливы аналогичные вычисления.

Для абсолютной методической погрешности поверки ваттметра находим

$$\Delta_f = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\omega L_1}{r_1} \right)^2 - \frac{\omega^2 r_2 L_2 C_2}{r_{2\Sigma}} \right] v(\omega\tau),$$

где  $r_{2\Sigma} = r_{20} + r_2$ ,

а значения величины  $v$  по-прежнему определены равенствами (11), (12) и (13).

Вясним теперь насколько функция  $f(\varphi)$  отличается от идеальной для ваттметра функции  $\cos \varphi$ .

Рассмотрим два вида поверочных сигналов: треугольный сигнал ( $\beta = \pi/2$ ) и сигнал трапецеидальной формы с исключенной третьей гармоникой ( $\beta = \pi/3$ ).

Для треугольной формы сигнала ( $\beta = \pi/2$ ) из соотношений (7) находим

$$a = \frac{6}{\pi^2}; \quad b = \frac{4}{\pi^3}; \quad \varphi_0 = 0.$$

Подставляя эти значения во второе уравнение (5), имеем

$$f(\varphi) = 1 - \frac{6}{\pi^2} \varphi^2 + \frac{4}{\pi^3} \varphi^3 \quad \text{при } 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}.$$

Обозначим

$$y = \cos \varphi - f(\varphi)$$

и найдем максимальное значение  $y$ , т.е. максимальную разность функций  $f(\varphi)$  и  $\cos \varphi$ , из условия  $dy/d\varphi = y' = 0$ . С использования пакета Mathcad 14,0 получим

$$y_{\max} = 0,02.$$

Поскольку

$$\cos \varphi_0 = \cos 0,2786\pi = 0,641,$$

то максимальное относительное отклонение

$$y_{\max} / \cos \varphi_0 = 0,02 / 0,641$$

составляет примерно 3 %.

Для сигнала трапецеидальной формы с исключенной третьей гармоникой ( $\beta = \pi/3$ ) из (7) находим

$$a = \frac{27}{5\pi^2}; \quad b = \frac{27}{10\pi^3};$$

$$\varphi_0 = \pi - 2\beta = \frac{\pi}{3}.$$

С учетом этих равенств из уравнений (5) получим

$$f(\varphi) = \begin{cases} 1 - \frac{27}{5\pi^2} \varphi^2 + \frac{27}{10\pi^3} \varphi^3, & 0 < \varphi < \frac{\pi}{3}; \\ 1 - \frac{27}{5\pi^2} \varphi^2 + \frac{27}{10\pi^3} \left[ \varphi^3 + \left( \varphi - \frac{\pi}{3} \right)^3 \right], & \frac{\pi}{3} < \varphi < \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (16)$$

Используя уравнение (16), исследуем методическую погрешность поверки ЭИППТ сигналами трапецеидальной формы с исключенной третьей гармоникой.

Полученные решения показывают, что во всей области изменения угла  $\varphi$

$$|f(\varphi) - \cos \varphi| \leq 0,0035,$$

или в относительных значениях  $\leq 0,4$  %, а это указывает на возможность применения поверочного сигнала трапецеидальной формы с исключенной третьей гармоникой (при  $\beta = \pi/3$ ) без коррекции фазовых сдвигов. При более грубых поверках можно взять треугольный поверочный сигнал, для которого получено

$$|f(\varphi) - \cos \varphi| \leq 0,02.$$

## Вывод

Из анализа полученных оценок методических погрешностей поверки ЭМИППТ следует, что соотношение относительных методических погрешностей поверки электромеханических амперметров и вольтметров, в которых отсутствует компенсация индуктивности измерительной цепи, сигналами трапецеидальной и прямоугольной форм имеет порядок величины  $\nu$ . Опираясь на полученные выше значения множителя  $\nu$  для различных поверочных сигналов, можно утверждать, что методическая погрешность поверки уменьшается в 5 раз для сигнала треугольной формы и в 10 раз для сигнала с исключенной третьей гармоникой по сравнению с сигналом прямоугольной формы.

Заметим, что методическая погрешность поверки носит систематический характер. В принципе она имеет и случайную составляющую за счет не точности задания параметров измерительных цепей поверяемых приборов. Но эта составляющая имеет второй порядок малости и ею можно пренебречь.

Таким образом, для поверки и калибровки электромеханических измерительных приборов переменного тока возможно и целесообразно применение сигналов треугольной и трапецеидальной форм, которые могут оказаться более простыми для формирования и регулирования по сравнению с прецизионными сигналами синусоидальной формы

Однако полученные оценки методических погрешностей позволяют сделать еще один достаточно важный для практики измерений электрических величин переменного тока вывод. Состоит он в том, что промышленные измерительные приборы электростатической, электродинамической и ферродинамической систем могут использоваться для измерения характеристик весьма распространенных сигналов специальной формы (прямоугольных, треугольных и трапецеидальных) с определенной потерей точности, которая при необходимости может

быть повышена введением поправок на методическую погрешность, как это в настоящее время рекомендуется для выпрямительных и электронных измерительных приборов, показания которых зависят от коэффициента формы и коэффициента амплитуды входных сигналов соответственно.

## Список литературы

1. Дьяков В.П. Генерация и генераторы сигналов / В.П. Дьяков. – М.: ДМК Пресс, 2009 – 384с.
2. Современные функциональные генераторы за рубежом: Экспресс-информация. – М.: ИНФОРМПРИБОР, – сер. ТС-5. – 1988. – 13с.
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. – Вип. 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. 175-177.
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. 131-133.
6. 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.
7. Чинков В.Н. Теоретические основы электромеханических измерительных приборов переменного тока сигналами прямоугольной формы / В.Н. Чинков, А.А. Каревик // Украинский метрологический журнал. – 2002. – № 2. – С. 58-61.

Поступила в редколлегию 11.07.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ОЦІНКИ МЕТОДИЧНОЇ ПОХИБКИ ПОВІРКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИБЛІДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ СИГНАЛАМИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ФОРМИ

В.М. Чинков, В.В. Мошаренков

*Отримано оцінку методичної похибки повірки електромеханічних вимірювальних приладів змінного струму приладами спеціальної форми.*

**Ключові слова:** сигнали спеціальної форми, електромеханічні вимірювальні прилади змінного струму, повірка, методична похибка.

## ESTIMATES OF METHODOLOGICAL ERRORS AT CHECK ELECTROMECHANICS MEASURING DEVICES BY THE SIGNALS OF NOSPREAD FUNCTION

V.N. Chinkov, V.V. Mosharenkov

*The estimates of methodical errors are got at a check electromechanics instrumentation by the signals of nospread function.*

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