

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 Δ_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 Δ_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 β , которое обеспечивает минимальное значение величины v , а значит, и составляющей методической погрешности поверки, обусловленной формой поверочного сигнала. Имеем $\beta = 3\pi/8$. Это значение β 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.

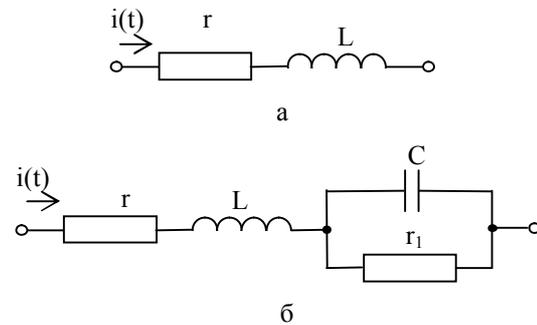


Рис. 1 Схемы измерительных цепей прибора а – без частотной компенсации индуктивности катушки; б – с частотной компенсацией индуктивности катушки

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 Δ_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 β , 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).

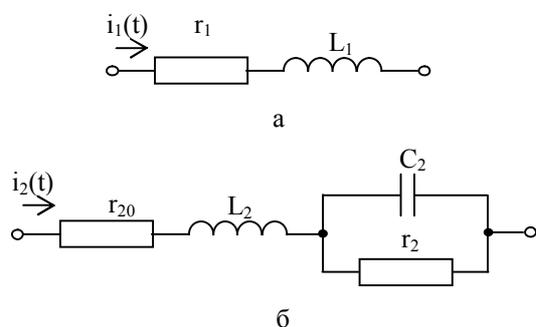


Рис. 2 Схемы измерительных цепей электродинамического ваттметра:
а – последовательной;
б – параллельной

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 φ

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

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 ЭИППТ 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 ν . Опираясь на полученные выше значения множителя ν 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.