

В.Н. ЧИНКОВ, д-р техн. наук, **Ю.А. МУНТЯН**

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВОГО СДВИГА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЕ-ЧАСТОТА

В статті розглянуті методи вимірювання фазового зсуву з проміжним перетворенням напруга-частота. Проаналізовано переваги й недоліки методів. Проведено оцінку похибки, обумовленої неточністю формування часових інтервалів.

In article methods of measurement of phase shift with preliminary transformation a voltage-frequency are considered. Their merits and demerits are analyzed. The estimation of the error caused by discrepancy of formation of time intervals is made.

Одним из основных параметров электрических сигналов синусоидальной формы является фазовый сдвиг (или разность фаз), поэтому измерение фазового сдвига занимает важное место в электро- и радиоизмерениях. Известны различные методы измерения фазовых сдвигов [1,2]. Большинство этих методов предназначено для измерения в диапазоне звуковых и высоких частот. В то же время на сегодняшний день недостаточно исследованы методы измерения фазовых сдвигов в диапазонах низких и инфранизких частотах.

Известный время - импульсный метод измерения фазовых сдвигов имеет низкую помехозащищенность, что ограничивает его применение в фазометрической аппаратуре.

Целью данной статьи является исследование помехозащищенного метода измерений фазовых сдвигов в области низких и инфранизких частот, основанного на предварительном преобразовании напряжение-частота с последующим интегрированием полученной функции в определенном интервале времени. Рассмотрим суть данного метода.

Пусть необходимо измерить фазовый сдвиг j_x между двумя синусоидальными сигналами, которые описываются выражениями:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_{1m} \sin \omega t ; \\ u_2(t) &= U_{2m} \sin(\omega t - j_x) , \end{aligned}$$

где U_{1m} , U_{2m} – амплитуды синусоидальных сигналов; ω – круговая частота.

Алгоритм измерения фазового сдвига состоит в следующем.

Один из входных сигналов, например $u_2(t)$, подвергается дифференцированию

$$u_3(t) = \frac{\partial u_2(t)}{\partial t} = K_{\partial} U_{2m} \omega \cos(\omega t - j_x) ,$$

где K_{∂} – коэффициент передачи блока дифференцирования.

Полученный сигнал $u_3(t)$ преобразуется в пропорциональную ему частоту следования импульсов с коэффициентом K_f :

$$f_x(t) = K_f u_3(t) = K_f K_{\partial} U_{2m} w \cos(\omega t - j_x).$$

Импульсы частоты $f_x(t)$ подсчитываются (интегрируются) дважды (рис. 1):

- один раз за временной интервал между переходами напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$ через ноль, т.е. в фазовом интервале j_x ;
- другой раз в течение временного интервала между переходами напряжения $u_2(t)$ через ноль и максимум, т.е. в фазовом интервале $(j_x, \frac{p}{2} + j_x)$.

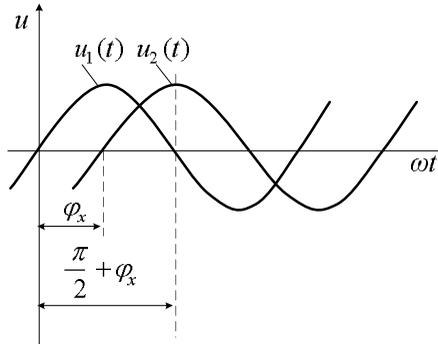


Рис. 1. Фазовые интервалы интегрирования импульсов частоты

В результате получим два пакета импульсов

$$N_1 = \frac{1}{w} \int_0^{j_x} f_x(t) d(\omega t) = K_f K_{\partial} U_{2m} \int_0^{j_x} \cos(\omega t - j_x) d(\omega t) = K_f K_{\partial} U_{2m} \sin j_x ;$$

$$N_2 = \frac{1}{w} \int_{j_x}^{\frac{p}{2} + j_x} f_x(t) d(\omega t) = K_f K_{\partial} U_{2m} \int_{j_x}^{\frac{p}{2} + j_x} \cos(\omega t - j_x) d(\omega t) = K_f K_{\partial} U_{2m} .$$

Измеряемый фазовый сдвиг j_x определится из следующего выражения:

$$j_x = \arcsin N_1 / N_2 . \quad (1)$$

Рассмотренный метод измерения фазовых сдвигов обладает следующими достоинствами.

Во-первых, он позволяет исключить зависимость результата измерения (1) от частоты исследуемых сигналов, что, в конечном итоге, приводит к расширению частотного диапазона и повышению точности, так как устраняется влияние нестабильности частоты измеряемых сигналов. Результат измерения не зависит также от амплитуды исследуемых сигналов.

Во-вторых, он имеет малое время измерения, не более одного - двух периодов исследуемых сигналов, что особенно важно при измерении сигналов инфранизкой частоты.

Возможен другой вариант метода измерения фазовых сдвигов с промежуточным преобразованием напряжение - частота. В нем частотному преобразованию подвергается модуль сигнала $u_2(t)$:

$$|u_2(t)| = U_{2m} |\sin(\omega t - j_x)|,$$

т. е.

$$f_x(t) = K_f U_{2m} |\sin(\omega t - j_x)| \quad (2)$$

Выражение (2) проинтегрируем дважды:

- на интервале от $(\frac{P}{2} + j_x)$ до p :

$$N_1 = \frac{1}{w} \int_{\frac{P}{2} + j_x}^p f_x(t) d(\omega t) = \frac{1}{w} \int_{\frac{P}{2} + j_x}^p K_f U_{2m} |\sin(\omega t - j_x)| d(\omega t) = \frac{K_f U_{2m}}{w} \cos j_x; \quad (3)$$

- на интервале от $(\frac{P}{2} + j_x)$ до $(p + j_x)$:

$$N_2 = \frac{1}{w} \int_{\frac{P}{2} + j_x}^{p + j_x} f_x(t) d(\omega t) = \frac{1}{w} \int_{\frac{P}{2} + j_x}^{p + j_x} K_f U_{2m} |\sin(\omega t - j_x)| d(\omega t) = \frac{K_f U_{2m}}{w}. \quad (4)$$

В этом случае результат измерения фазового сдвига j_x находим по формуле:

$$j_x = \arccos N_1 / N_2. \quad (5)$$

Кроме инструментальной погрешности преобразователя напряжение-частота, одной из доминирующих погрешностей данного метода измерения фазовых сдвигов является погрешность, обусловленная неточностью формирования временных интервалов, в течение которых осуществляется интегрирование частоты $f_x(t)$ и образование промежуточных результатов N_1 и N_2 . Оценим эту погрешность.

Обозначим через Δj_1 , Δj_2 и Δj_3 фазовые погрешности выделения моментов, соответствующих фазам:

$$wt_1 = \frac{p}{2} + j_x; \quad wt_2 = p; \quad wt_3 = p + j_x.$$

С учетом погрешностей Δj_1 и Δj_2 из выражения (3) находим

$$\begin{aligned} \mathcal{N}_1 &= \frac{1}{w} \int_{\frac{p}{2} + j_x + \Delta j_1}^{p + \Delta j_2} f_x(t) d(wt) = \frac{K_f U_{2m}}{w} \int_{\frac{p}{2} + j_x + \Delta j_1}^{p + \Delta j_2} \sin(wt - j_x) d(wt) = \\ &= (\cos j_x \cos \Delta j_2 + \sin j_x \sin \Delta j_2 - \sin \Delta j_1) \frac{K_f U_{2m}}{w}. \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая, что погрешности Δj_1 , Δj_2 и Δj_3 малы, используем разложение в степенные ряды до линейного члена, имеем:

$$\cos \Delta j_2 \approx 1; \quad \sin \Delta j_1 \approx \Delta j_1; \quad \sin \Delta j_2 \approx \Delta j_2. \quad (7)$$

Тогда выражение (7) принимает вид:

$$\tilde{N}_1 = N_1 - \frac{K_f U_{2m}}{w} (\Delta j_1 + \Delta j_2 \sin j_x). \quad (8)$$

Аналогично из выражения (4) получим:

$$\begin{aligned} \mathcal{N}_2 &= \frac{1}{w} \int_{\frac{p}{2} + j_x + \Delta j_1}^{p + j_x + \Delta j_3} f_x(t) d(wt) = \frac{K_f U_{2m}}{w} \int_{\frac{p}{2} + j_x + \Delta j_1}^{p + j_x + \Delta j_3} \sin(wt - j_x) d(wt) = \\ &= \frac{K_f U_{2m}}{w} (\cos \Delta j_3 - \sin \Delta j_1) \approx N_2 - \frac{K_f U_{2m}}{w} \Delta j_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Из соотношений (8) и (9) находим абсолютные погрешности измерений

$$\Delta N_1 = \mathcal{N}_1 - N = -\frac{K_f U_{2m}}{w} (\Delta j_1 + \Delta j_2 \sin j_x);$$

$$\Delta N_2 = \mathcal{N}_2 - N_2 = -\frac{K_f U_{2m}}{w} \Delta j_1.$$

Полагая $|\Delta j_1| = |\Delta j_2| = \Delta j_{\max} = \Delta j$, получим предельные значения погрешностей:

$$\Delta N_{1m} = \frac{K_f U_{2m}}{w} \Delta j (1 + \sin j_x);$$

$$\Delta N_{2m} = \frac{K_f U_{2m}}{w} \Delta j.$$

Пределы изменения абсолютных погрешностей в измерении величин N_1 и N_2 :

$$\frac{K_f U_{2m}}{w} \Delta j \leq \Delta N_{1m} \leq \frac{K_f U_{2m}}{w} 2\Delta j ;$$

$$\Delta N_{2m} \leq \frac{K_f U_{2m}}{w} \Delta j .$$

Используя выражения (6) и (9), найдем абсолютную погрешность определения $\cos j_x$:

$$\Delta N = \frac{N_1}{N_2} - \frac{N_1}{N_2} = \frac{\cos \Delta j_2 \cos j_x + \sin \Delta j_2 \sin \Delta j - \sin j_1 - \cos j_x}{\cos \Delta j_3 - \sin \Delta j_1} =$$

$$= \frac{\cos \Delta j_2 \cos j_x + \sin \Delta j_2 \sin j_x - \sin j_1 - \cos \Delta j_3 \cos j_x + \sin \Delta j_1 \cos j_x}{\cos \Delta j_3 - \sin \Delta j_1} .$$

С учетом равенств (7) получим:

$$\Delta N \approx \frac{\sin \Delta j \cos j_x + \sin \Delta j \sin j_x - \sin \Delta j}{\cos \Delta j - \sin \Delta j} = \frac{\Delta j}{1 - \Delta j} (\cos j_x + \sin j_x - 1). \quad (10)$$

Составляющую погрешности измерения фазового сдвига, вносимую неточностью задания интервалов интегрирования, находим из выражения (5):

$$\Delta j = \frac{\partial j}{\partial N} \cdot \Delta N = \frac{\Delta N}{\sqrt{1 - N^2}} ;$$

где ΔN определяется из соотношения (10).

Таким образом, в статье предложены и исследованы два варианта метода измерения фазовых сдвигов в низком и инфранизком диапазонах частот с предварительным преобразованием исходных сигналов в пропорциональную частоту следования импульсов и последующим интегрированием полученных частот в определенных фазовых интервалах, что обеспечивает повышение помехозащищенности измерений.

Список литературы. 1. Галахова О. П., Колтик Е. Д., Кравченко С. А. Основы фазометрии. – М.: Энергия, 1976 2. Кузнецов В. А., Долгов В. А., Коневских В. М. и др. Измерения в электронике: Справочник Энергоатомиздат, 1987.- 512 с.

Поступила в редколлегию 14.11.08