

# О сличении эталонов угла фазового сдвига

С. А. Кравченко, А. Н. Пронин, Д. Д. Передрий, В. П. Пиастро  
Всероссийский НИИ метрологии им. Д.И.Менделеева  
S.A.Kravchenko@vniim.ru

**Аннотация.** Possibilities of comparison of two standards of phase shift angle in the angle range from 0 to 360° are considered. The range of frequencies is from infra-low values (0.001-0.01 Hz) to 20 MHz. Recommendations are given on the correct inclusion of the equipment of the two standards; otherwise, the errors of comparison may be from 0.0001-2° and up to 0.001-3°. It is proposed to use the comparator KUFSA-1 that has 0.0001 resolution in the frequency range from 0.001 Hz to 200 kHz. At higher frequencies (up to 20 MHz) it is necessary to apply frequency conversion.

**Keywords:** phase shift angle; phase difference meter; standards

Единица угла фазового сдвига (УФС) – электрический градус – является одной из разновидностей существования единицы плоского угла международной системы СИ в специальных условиях, а именно между двумя электрическими переменными напряжениями в широком диапазоне частот, в отличие от УФС между током и напряжением, который находит применение в электроэнергетике и выражается через свой косинус ( $\cos \varphi$ ) и измеряется электрическими фазометрами (косинусофиметрами) при частотах силовой сети, 50, 60, 400 Гц со шкалами от 0 до 1 ( $\cos \varphi$  может изменяться от -1 до 0 и до +1).

УФС между двумя напряжениями нельзя выразить одним числом, так как напряжения могут изменяться как по диапазону частот (от инфранизких, называемых иногда инфразвуковыми, до высоких и сверхвысоких частот, например от 0,001 Гц до 20 или до 100 МГц), так и по амплитуде от долей милливольт до сотен вольт. К воздействию на УФС имеют также значения параметров цепей ( $R, L, C$ ), в которых работают или могут работать переменные напряжения. Измеряют УФС между двумя электрическими напряжениями с помощью измерителей разности фаз, иногда в практике называемыми электронными фазометрами [1] со шкалами измерений от 0 до 180 или до 360(...°).

Эталоны единицы УФС, начиная от Государственного до рабочего эталона любых разрядов, являются 2-х канальными генераторами переменных гармонических напряжений, частоты которых могут совпадать только в особых случаях, если приняты соответствующие меры по их синхронизации. Во всех остальных случаях частоты различны и появляются биения, которые будут нарушать процессы измерения. Поэтому прямо сличить такие эталоны нельзя. Сличение возможно с использованием широкополосных по частоте и высокоточных по фазе измерителей разности фаз (ИРФ). В 1989 г. ВНИИМ им. Д.И.Менделеева (рук. лаб. д.т.н. С.А. Кравченко, н.с.

В. Новодерёжкин, М. Головин, В. Фоменков, В. Кудряшёв, И. Шохор, С. Красавина, Т. Комарова) и Красноярский политехнический институт, кафедра д.т.н. Чмыха М.К. «Электроника» разработали схемы (С. Чепурных, В. Кокорин, М. Мичурина, В. Новиков, С. Алёшечкин и др, а завод «Эталон» (г. Ленинград)) изготовил 12 образцов компаратора угла фазового сдвига КУФСА-1 с погрешностью 0,0001° в диапазоне частот от 0,01 Гц до 500 кГц. Движение по частоте вниз до 0,01–0,001 Гц и вверх до 5–10 МГц и выше до 20 МГц приводит к подъёму погрешности в 4–5 раз (говорят о подъёме левого и правого крыльев погрешности). Таким образом, вместо желаемой прямой линии частотно-фазовой погрешности получается корытообразная. Использование таких ИРФ возможно только при одном условии, чтобы эта корытообразная характеристика не смещалась за время сличения, т.е. чтобы не было бы добавления погрешности от временных или тепловых уходов. Временные уходы сказываются в течение месяцев или лет, а тепловые – довольно быстро от изменения температуры, от проветривания при открытии окон, форточек и т.п. Если приборы прогреты в течение несколько часов, тепловых уходов нет, можно начинать сличение при обязательном условии: полного соответствии поверяемых эталонов. Например, 100,003 кГц и 100,01 кГц. Расхождение в 0,01% вызовет погрешность в 0,001–0,002°. Сличение в диапазоне «взмаха крыльев» требует более жёсткого совмещения частот, ибо та же разница частот даёт в 3–4 раза больше погрешности из-за крутизны подъёма крыльев. Сличение начинают снятием фазо-фазовой характеристики  $|\varphi_{\text{эт}} - \varphi_{\text{ирф}}|_{t1} = \Delta\varphi_1$  между государственным эталоном единицы угла фазового сдвига ГЭТ УФС и ИРФ.

Затем на рабочем эталоне РЭ УФС устанавливают те же значения частоты, уровни напряжений по каналам, те же значения сопротивлений, кабелей, что и в первом случае, и снимают фазо-фазовую характеристику между РЭТ УФС и ИРФ.  $|\varphi_{\text{рэт}} - \varphi_{\text{ирф}}|_{t2} = \Delta\varphi_2$ . При  $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 + \delta\varphi = 0,0002-3^\circ$ . Учитывая, что на сличение требуется двойное время, возможен более высокий уровень погрешности. Более точно происходит сличение с помощью компаратора УФС типа КУФСА-1, в котором каждый канал (один ИРФ) соединён со своим эталоном ГЭТ и РЭТ. Каналы выполнены совершенно идентичными, но и для них остаются в силе те же правила о частотах и о других диапазонах величин, связанных с напряжениями в каналах. При этом, вследствие того, что измерение идёт сразу на двух эталонах, время на сличение уменьшается вдвое и также снижается погрешность сличения. Разрешающая способность УФС равна 0,0001°, СКО случайной погрешности 0,0003 и до 0,0009° на частотах от

0,01 Гц и до 1 МГц соответственно. На более высоких частотах 10 и 20 МГц необходимо применять преобразование частоты до выходной частоты [2] преобразователя порядка 1,5–2 кГц, чтобы погрешность не превышала  $0,004\text{--}0,005^\circ$ . Компаратор фазы КУФСА-1 может работать с усреднением от одного периода для инфранизких частот до 50 периодов для высоких от 1 кГц до 20 МГц с временем измерения от 1 до 5 с. Входная амплитуда сигналов 0,1–1 В.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кравченко С.А., Пиастро В.П., Пронин А.Н. Поверка и калибровка аппаратуры в области фазовых измерений в диапазоне частот от низких и до 10 МГц. Всероссийская НТК, посвящённая Дню Радио: сб. тр. 72-й науч.- техн. конф., посвященной Дню радио. СПб 20-28 апреля 2017 г. СПб: Изд-во СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», с. 515-517. ISBN 978-5-7629-2044-5
- [2] А.С. 1734037 СССР / С.А. Кравченко и др. /Открытия. Изобретения. 1989. №18.