

УДК 621.372.8

С.А. КРАВЧЕНКО

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева», Санкт-Петербург

ИСХОДНЫЕ МЕРЫ В ГОСУДАРСТВЕННОМ
ЭТАЛОНЕ ГЭТ61-88 В ОБЛАСТИ ФАЗОМЕТРИИ

Статья посвящена исходным мерам воспроизведения угла фазового сдвига (УФС), с высочайшей точностью для разных частот, которые вошли в Государственный эталон единицы УФС (ГЭТ61-88) в диапазоне частот от 0,01 Гц и до 20 (30) МГц.

S.A. KRAVCHENKO

FSUE "VNIIM. Mendeleev", St. Petersburg

REFERENCE MEASURES OF THE STATE MEASUREMENT
STANDARD GET61-88 FOR THE FIELD OF PSAMETRY

The paper deals with reference measures for reproduction of phase shift angle (PSA) with highest accuracy for different frequencies, that are part the State measurement Standard PSA (ГЭТ61-88) in the frequency range from 0,01 up to 20 (30) MHz.

1. Фазометрия в народном хозяйстве

Развитию фазовых измерений, дало радиотехнике внедрение электронных ламп в 1916г. Начали бурно разрабатываться разнообразные методы и аппаратура для измерения фазовых сдвигов в широком спектре частот. В 1922 г. Ф.Траутвайн предложил схемы фазометров с ограничением амплитуды, а Г.Михалкэ с использованием векторных соотношений вида "сумма-разность".

В тридцатых годах XX века начинают внедряться компенсационные методы измерения: фазовых сдвигов, основанные на применении точных фазовращателей и нуль-индикаторов. В частности, фазометры компенсационного типа описанных в работах Р.Найквиста, Л.И. Мандельштама, И. Турнера и Р. Макнамары, Ла-Пьерра В.О. Арутюнова, К.П. Широкова, Н.Д. Папалекси и Л.И. Мандельштама, Д. Морриссона, Н.Н. Соловьёва и др., обеспечили измерение угла фазовых сдвигов (УФС) с погрешностью не более $3град$ в диапазоне звуковых частот. В середине 50-х годов во всем мире начался промышленный выпуск фазометров [1]. В настоящее время "фазовый" метод, т.е. метод, когда измеряемая величина преобразуется в фазовый сдвиг двух сигналов, находит, широкое применение в новейших областях науки и техники. На рис 1 приведена круговая диаграмма с областями народного хозяйства, где используются фазовые измерения.

Угловая единица по системе СИ имеет статус: дополнительной системной единицы, исходя из плоского угла в механике, которая и является первичной, а угловая единица в области фазометрии между двумя электрическими напряжениями является случаем плоского угла в специальных условиях, а именно между двумя электрическими напряжениями в заданном диапазоне частот. Всего таких мер 12. (Например, УФС между током и напряжением в электроэнергетике на 50 Гц и 60 Гц, УФС между орбитами электрона и протона в ядре радиоизотопных материалов, между углом 2-х радиолучей вдоль посадочной полосы и радиолучом воздушного судна (самолёта) в гражданской и военной авиации при слепой посадке воздушного судна и др.). УФС выражают в единицах «радиан», градациями которого являются значения «градус» с соответствующей разбивкой сто единиц «гон», на минуты и секунды по шкале времени или по десятичной шкале. Наиболее точные исходные меры основываются на естественных физических константах. УФС между двумя электрическими напряжениями восходит к эталону частоты, который имеет в наш век наивысшую точность 10^{-13} и доли 10^{-14} .

Стандарты фазы для воспроизведения УФС между двумя электрическими напряжениями имеются как в промышленно развитых странах – в РФ, США, Франции, Англии, Германии, Японии, так и менее развитых – в Чехии (бывшей Чехословакии), Польше (бывшей ПНР), Болгарии.(бывшей НРБ) бывшего СЭВ. В основном они созданы для низких и звуковых частот [2]. Стандарты фазы имеются в НИСТ – национальный институт стандартов и технологии (США), в LCIE – (центральной лаборатории



Рис 1. Области применения фазовых измерений

электроизмерений NMI - национального метрологического института Франции), в Англии, в Японии и др.

Стандарт УФС в НИСТ (США) имеет погрешность не более (0,003-0,01) град только при сравнительно низких частотах – от 0,01Гц до 20-50 кГц [3]. Кроме задач аттестации фазометрической аппаратуры на низких частотах, задачи фазометрии требуются современной науке и технике (кольцевые ускорители элементарных частиц, оптико-электронные системы для контроля нанотехнологий при производстве микросхем большой мощности в Гига – и Тера байтовых структурах и др.) и на высоких частотах, в частности задания УФС на частотах до 30 -100 МГц и выше с разрешающей способностью (10^{-3} - 10^{-4}) град. Трудность получения таких параметров заключается в следующем. Повышение точности обычно обеспечивают делением частоты источника в двух каналах, например, от 10 до 100раз.

$$u = \frac{U \cdot (\sin 2\pi ft + \varphi + \Delta\varphi)}{n}$$

При этом очевидно делятся, как угол фазового сдвига (φ), так и погрешность ($\Delta\varphi$), так и частота f . Т.е. желаемое не достигается: чем выше точность, тем ниже частота и наоборот. Так, в приборе Ф1-4 на частотах ниже 1 МГц (36 МГц делится в 36 раз), дискретность по фазе равна $360^\circ:36=10^\circ$. Для разрешающей способности хотя бы в 1° на 10 МГц необходимо: деление частоты 3,6 ГГц, т.е. $3600/360=10$ МГц, а фаза $360^\circ/360=1^\circ$, что совсем не так то просто на таких частотах.

2. Принцип действия исходной меры в ГЭТ 61-88

Этот «замкнутый круг» удалось разорвать, опираясь на эффект деления частоты в декадной структуре прямого синтеза частот, основанного на алгоритме $8+1+1$, заложенного в синтезаторы частоты, например типа Ч6-31. Принцип действия расчётной ИМ основан на использовании эффекта линейной зависимости фазы от времени с помощью манипуляции двух когерентных, близких по частоте сигналов, получаемых - от рабочего эталона частоты типа СЧВ-74 с последующим делением частоты (фазы) в двух каналах для воспроизведения единицы УФС. Уравнение воспроизведения приращений УФС $\Delta\varphi$ имеет вид:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = (+\Delta\omega) \cdot \Delta t - \omega \Delta t, \quad (1)$$

где φ_1 и φ_2 – значения фазы в начале и конце процесса задания УФС;

ω , $\Delta\omega$ – точные значения круговой частоты $\omega = 2\pi f$ и приращения частоты $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$, которые обеспечивают расчётное значение УФС за точно заданный промежуток времени t . Структурная схема исходной меры единицы УФС между двумя электрическими напряжениями представлена на рис.2. От образцовой меры частоты (ОМЧ), входящей в поверочную схему средств измерения времени и частоты с нестабильностью частоты 10^{-12} , с частотой f_0 поступает к системе устройств воспроизведения (СУВ) УФС. В нём используются методы преобразования опорной частоты f_0 для получения выходных сигналов с

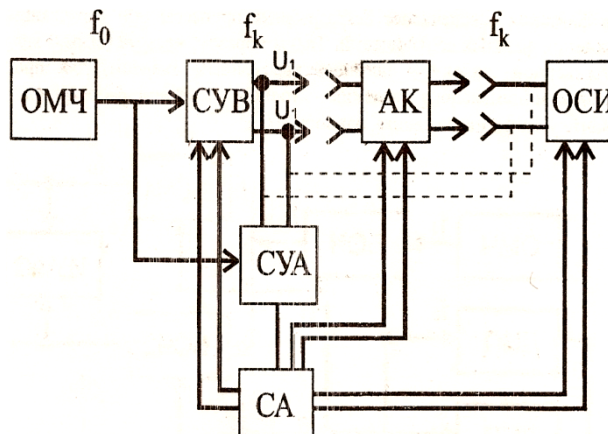


Рис.2. Структурная схема эталона фазового сдвига

требуемыми фазовыми соотношениями на частотах f_k равных 0,01 и 1000 Гц, 100 кГц, 1, 10, 20 и 30 МГц [4]. Параллельно выходным зажимам U_1 , U_2 подключена система устройств аттестации (СУА) УФС, которая состоит из фазоизмерительных устройств, имеющих наивысшую точность на указанных частотах. СУА синхронизируется от ОМЧ. Устройства аттестации предназначены также для передачи размера единицы УФС образцовым средствам измерений (ОСИ) – калибраторам фазы методом прямых измерений (см. пунктирные линии). При неравных и некратных частотах f_k и f_k' это обеспечивается с помощью автоматизированного компаратора (АК) УФС. Для управления всеми процедурами измерения эталона служит система автоматизации СА.

3. Исходная мера УФС на повышенные частоты

Устройство воспроизведения УФС на повышенных частотах (100 кГц, 1, 10, 20 и 30 МГц) работает следующим образом. От образцовой меры частоты (ОМЧ) сигнал с частотой кварца f_0 поступает к блоку опорных частот (БОЧ) с частотами от f_1-9 , которые поступают к блокам смешения частот (БСЧ₁ и БСЧ₂), а выходные сигналы f_0 подключены к выходным зажимам U_1 и U_2 и ко входам измерителя УФС (ИУФС). От БОЧ отбираются две неравные, но близкие по значению и синхронные от кварца в БОЧ частоты f_1 и f_2 к датчикам нуль-перехода (ДНП), выходы которых замкнуты на входы схемы совпадений (СС). Совпадение f_2 с f_1 может произойти только 1 раз за период f_1 , т.к. они близки, но не равны друг другу, т.е. один раз за 360° , который выделяется синхроимпульсами. Этот временной период является естественной эталонной временной единицей (временным квантом) для процесса задания Угла Фазового Сдвига (квантом УФС в

360°) [5]. Ибо меньшего угла просто сделать не возможно. Схема СС в моменты совпадений нулей напряжений, переключает электронный релейный элемент (ЭРЭ) через таймер Т из положения «а» в положение «б», при этом частота f_1 поступающая на БСЧ2 уступает место частоте f_2 и фаза на выходе U_2 начинает обгонять по фазе напряжение на выходе U_1 согласно уравнения (1). Главное условие успеха такого метода воспроизведения кванта УФС, чтобы процессы смены частот должны происходить за очень короткое время (нано 10^{-9} и пикосекунды – 10^{-12}) меньше, чем фазовые переходные процессы в LC-цепях, настроенных на два порядка более низких частот (10^7), происходили бы без разрыва установленных ранее и к прежним начинают добавляться новые, управляемыми синхроимпульсами. Если это соблюдается, то дальнейшее дело техники – подсчёт нужного числа синхроимпульсов в блоке Т в системе устройств воспроизведения (СУВ) УФС. Причём это число можно вводить либо от руки в Т (прибор Ф5264), либо от компьютера согласно расчёта требуемого значения УФС.

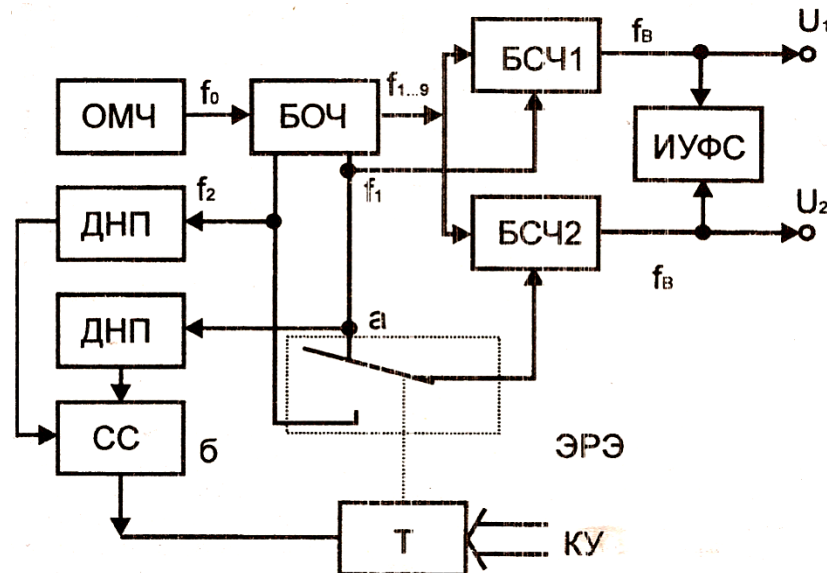


Рис.3 Устройство воспроизведения УФС на высоких частотах

В СУВ УФС используются методы преобразования опорной частоты $f_0 = f_{\text{Э}}$ для получения выходных сигналов с требуемыми фазовыми соотношениями на частотах f_k , равных 100 кГц, 1, 10, 20 и 30 МГц с помощью устройства сверхглубокого деления.

4. Устройство сверхглубокого деления частоты (УСГДЧ)

На выходах U_1 и U_2 появляются сигналы, между которыми УФС может меняться от 0 до 360° только через 360° хоть до 1000°, хоть до десятков тысяч градусов, а для меньшего значения надо этот угол делить. Обычным делением частоты (фазы) называют от единиц до 100 раз, а глубоким делением - до 1000 раз. А деление частоты (фазы) в миллион раз и больше называют сверхглубоким делением. Такие значения деления обеспечат приращения УФС величиной $360^\circ : n = 10^6 = 0,000036^\circ$; $n = 10^7 = 0,0000036^\circ$; $n = 10^8 = 0,00000036^\circ$; $n = 10^9 = 0,000000036^\circ$. Рассмотрим подробнее процессы при СГДЧ на основе алгоритма 8+1+1 [5].

От кварцевого генератора (КГ) сигнал частотой $f_{\text{Э}}$ поступает в блок опорных частот БОЧ, откуда сигналы с частотами f_8, f_1, f_1 подаются в декадные преобразователи ДП1 – ДПm двух идентичных каналов I, II (рис.4). Преобразователи ДП1-ДПm содержат два смесителя частот С1и С2 и декадный делитель частоты ДЧ (фильтры для упрощения не показаны). ДП1 – ДПm работают на методе прямого синтеза когерентных сигналов согласно выражению:

$$\left[\frac{\{F_{\text{Э}}(8+1+1)\}K + m}{10} \right] = F_{\text{Э}} \cdot \left\{ K + \frac{m}{10} \right\},$$

где $K > 2,3,4, \dots$ - коэффициент, обеспечивающий получение чистой формы сигнала, $0 \leq m \leq 9$ - коэффициент изменения выходной частоты в пределах одной декады.

Используется m от 0 до 1. $F_8 = F_{\text{Э}} \cdot 8, F_1 = F_{\text{Э}} \cdot 1 = F_{\text{Э}} \cdot 1$. Для удобства задания расчетных УФС и частот все декады кроме первой работают при $m = 0$, т.е.

$$\frac{F_{\text{Э}}(8+1+1) \cdot K}{10} = F_{\text{Э}}K.$$

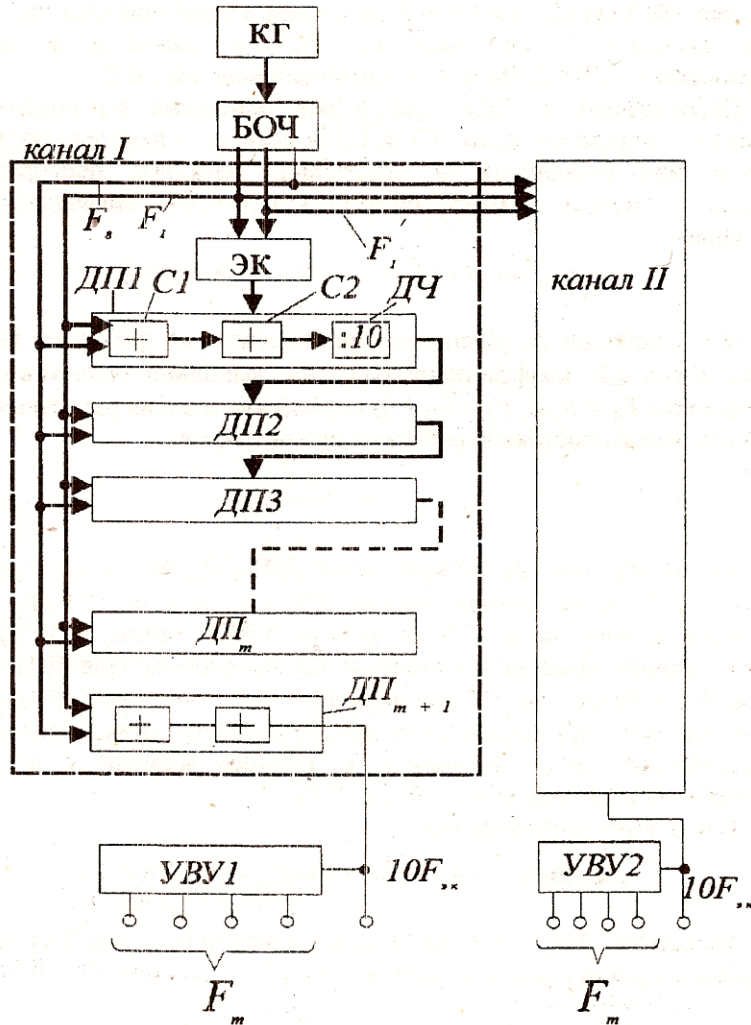


Рис. 4 Устройство сверхглубокого деления частоты (УСГДЧ)

Таким образом, на выходе декад ДП₁- ДП_m будут присутствовать частоты $F_{\text{Э}} \cdot K$, а на выходе декады ДП_{m+1} частота $K F_{\text{Э}}$, которая подводится к узлу выходных устройств УВУ1 канала 1 и УВУ2 канала 2. УФС задаётся в смесителе С2 преобразователя ДП1 заменой значения частоты $F_1 = F_{\text{Э}} \cdot (K + m_0 / 10)$ на частоту $F_1' = F_1' = F_{\text{Э}} \cdot (K + m_1 / 10)$ в моменты совпадения нуль - переходов этих частот, соответствующим точке момента $m = 0$ на $m_1 = 1$ с сохранением фазового состояния в течении t и далее с возвращением в состояние $m = 0$. (Рис 5). Тогда приращение УФС выразится как: $= 2\pi (F_1 - F_1') \cdot t$. На выходе ДП_{m+1}, т.е. на выходах каналов I и II получаем расчётный фазовый сдвиг для частоты $10F_{\text{Э}}K$:

$$\varphi_{\text{расч}} = \frac{360 (F_1' - F_1) \cdot t}{10^m} = \frac{360 [(F_{\text{Э}}(K + 0,1) - (F_{\text{Э}} K))] \cdot t}{10^m}, \quad (2)$$

где m - число декадных преобразователей. Время $t = \theta \cdot T_{\text{min}}$ определяется числом пачек θ 2 сигналов частоты F_1 «врезанных» в сигнал частотой F_1' . При этом точное совпадение этих сигналов с разными частотами проходит через период $T_{\text{min}} = 1 / (F_1 - F_1')$. Расчётное единичное приращение УФС будет иметь вид:

$$\varphi_{\text{расч.приращ.}} = \frac{360(\theta - 1)}{10^m} \text{ град.}$$

Оценим это выражение. При $F_{\text{Э}} = 1 \text{ МГц}$, $K = 3$ ($K = 3$ выбрано из требования качественного по форме суммарного по частоте сигнала во всех декадах и требуемого уровня выходной частоты в исходной мере УФС) из (1) получим: $F_{\text{Э}} = 1 \text{ МГц}$, $K \cdot F_{\text{Э}} = 3 \text{ МГц}$, $F_8 = K \cdot F_{\text{Э}} \cdot 8 = 24 \text{ МГц}$, $F_1 = 3,0 \text{ МГц}$, $F_1' = 3,1 \text{ МГц}$, $K F_{\text{Э}} = (24 + 3 + 3) = 30 \text{ МГц}$, $T_{\text{min}} = 10^{-5} \text{ с}$ - это время прохождения 1- го периода частоты 100 кГц , получаемого от разности $3,1 \text{ МГц} - 3,0 \text{ МГц} = 0,1 \text{ МГц} = 100 \text{ кГц}$. Минимальное разрешение по фазе на 30 МГц (при $\theta = 2$) неизменяемый дискрет - это естественный эталон угла фазового сдвига при $m = 7$ (10^7) составит значение,

$$\varphi_{\min} = \frac{360 \cdot (2-1)}{10^m} = 0,000036 \text{ град.}$$

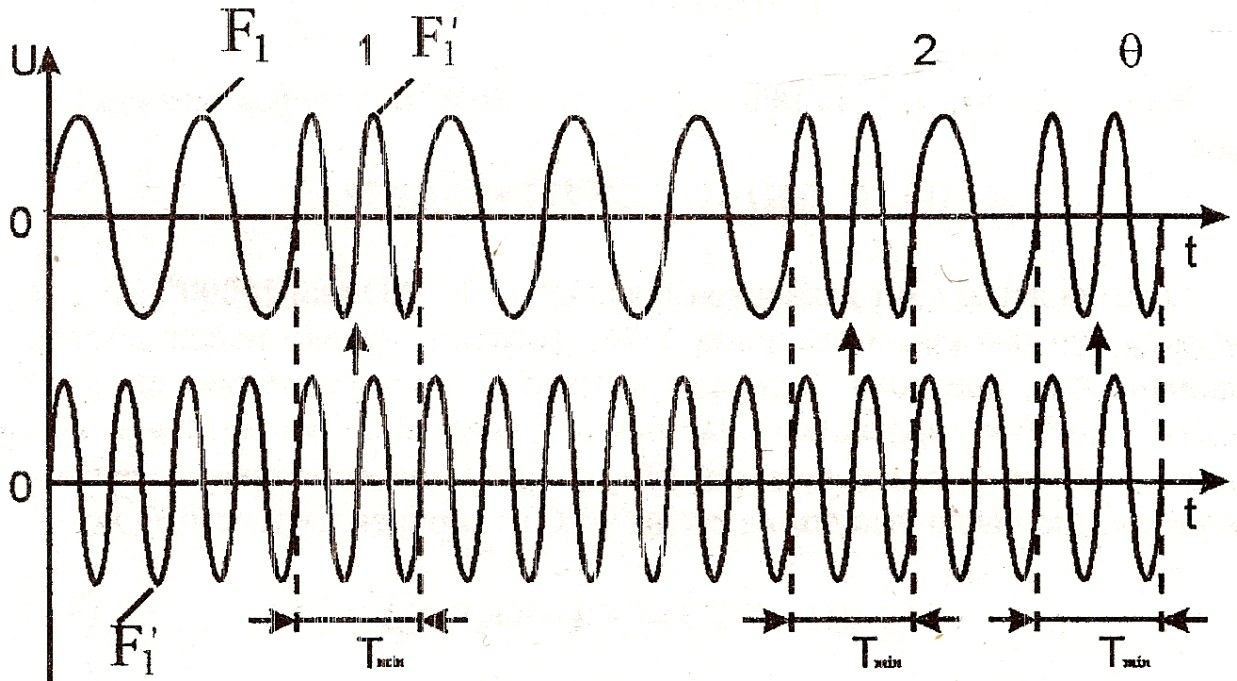


Рис.5 Принцип неразрывности колебательного процесса при переключении частот.

Нужный УФС обеспечивается ёмкостью счётчика θ с записью вручную или от ЭВМ в программируемом узле счётчика. Необходимое число в зависимости от требуемого значения УФС получается из выражения для $m=7$:

$$\theta = \frac{\varphi \cdot 10^m}{360} + 1.$$

Например, для $\varphi = 10,000 \text{ град}$, $\theta = 277777,7 + 1 = 277779$. Отсюда легко найти значение θ для любого значения φ . Например для обычных УФС в 10° и 100° , а также необычных $-1000^\circ; 10000^\circ$ [6]. Т.е. для получения кумулятивных (много больших 360°) значений УФС, которые широко используются, например, для контроля аппаратуры цветного телевидения высокой чёткости. Другие выходные частоты получаются соответствующим делением частоты сигнала частотой $10KF_\Delta$. При этом естественно, должно быть увеличено число импульсов ввода УФС на верхней частоте $10KF_\Delta$.

$$\theta = \left\{ \frac{\varphi \cdot 10^m}{360} \cdot \frac{10 \cdot K \cdot F_\Delta}{F_{\text{вых}}} \right\} + 1 = \left\{ \frac{\varphi \cdot 10^m}{360} \cdot \frac{30 \text{ МГц}}{F_{\text{вых}}} \right\} + 1, \quad (3)$$

где $F_{\text{вых}}$ – любая из требуемых частот от 10 до 0,001 МГц. Частоту 20 МГц можно получить умножением 30 МГц в 2 раза и поделив 60 МГц на 3. Более низкие частоты можно найти из частоты 100 кГц синхронным гетеродинным преобразованием частоты с помощью генератора Г6-38 (в диапазоне частот 0,001 Гц - 1 МГц с шагом 0,001 Гц) или синтезатора частоты типа Ч6-31. В первом случае можно получить диапазон частот 0,001 Гц – 1 кГц с шагом по частоте в 0,001 Гц, во втором – диапазон 0,01 Гц – 1 кГц с шагом в 0,01 Гц.

Основную теоретическую погрешность такого метода воспроизведения УФС можно определить из (1), найдя полный дифференциал, обозначив C через $360/10^7$ и заменив производные на конечные приращения:

$$\partial = C \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial F_\Delta} dF_\Delta + \frac{\partial \varphi}{\partial t} dt \right\} = C (t \cdot F_\Delta + F_\Delta \cdot t), \quad (4)$$

где ΔF_Δ – нестабильность кварцевого генератора в стандарте частоты и времени СЧВ-74; Δt – временная погрешность коммутатора ЭК частот F_1 и F_1' , t – период разницы частот $(F_1' - F_1)$. При $F_\Delta = 10^{-8}$ с, $F_1 = 10^6$ Гц, $t = 10^{-5}$ с, $\Delta t = 10 \cdot 10^{-9}$ с. Итого имеем:

$$\partial = \frac{36}{10^7} \cdot \left[\left(\frac{10^{-8}}{10^{-5}} \right) + 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \right] = (0,36 \cdot 10^{-7})^\circ.$$

5. Методы аттестации ИМ

Исследования проводили разными методами для обеспечения метрологической надёжности этого

нового способа воспроизведения УФС на частотах 30; 1 МГц и 100 кГц. Для частоты 30 МГц, число импульсов θ , необходимого для воспроизведения УФС в $10,000^\circ$ равно 27777,9. Для частот 20; 10; 1; 0,1 МГц соответственно 416667; 833333; 8333333; 8333333. На 30 МГц «использовали метод восхода Солнца». (Это название метода придумал не автор статьи, а учёные астрономических центров мировой науки – астрономии, а автор предложил только применить его к области эталонной фазометрии, т.к. момент появления Солнца астрономами рассчитывается очень точно.) Также точно можно рассчитать момент появления видимой цифры УФС из суммы невидимых значений. Суть метода заключается в установлении невидимого, рассчитанного самого малого значения УФС на табло программируемого счётчика Ф5264 и подсчёта числа раз вводимого этого **невидимого** угла до появления **видимого** самого малого значения УФС на шкале-табло **серийного** фазометра. Комиссия Госстандарта СССР из всех светил в области фазометрии не хотела верить никаким расчётам, а требовала «обычную метрологическую канву»: т.е. раз вы официально при нас заявляете о том, чего в мире и у нас и наших супостатов из НАТО нет – **0,0001° на высокой частоте - 30 МГц**, тогда дайте сейчас же в комиссию Госстандарта СССР фазометр с ценой деления $0,00001^\circ$, а не Ф2-34 с разрешением в $0,01 \text{ град}$, который работает точно только на 10-15 кГц. Докажите нам правильность ваших исследований. Иначе мы не верим всем вашим расчётам, протоколам и отказываемся подписывать акт приёма эталона, как бездоказательное собрание приборов, не соответствующего по МХ статусу эталона. И тут член комиссии Госстандарта И.Х.Шохор произнёс: «Святослав Анатольевич! Давайте объясним уважаемой комиссии уникальность точности нашего эталона, как метода восхода Солнца. И им тоже станет ясно». Суть состоит в следующем: Опорный генератор ОГ (рис.6,а) ведёт устройство сверхглубокого деления частоты УСГД в 2-х каналах на частоте 30 МГц. Сигналы частотой 30,010 МГц от гетеродина Г смешиваются в 2-х канальном преобразователе частоты ПЧ и в виде сигналов 10 кГц поступают на входы фазометра Ф типа Ф2-34 с разрешением по фазе $0,01^\circ$.

Установив на Ф2-34 значение $000,00^\circ$, а на счётчике импульсов Ф5264 набрав число импульсов из расчёта самого малого невидимого угла - $0,0001^\circ$, начинают его ввод считать как суммирование, вводя его 100 раз и глядя на шкалу-табло Ф2-34, где должна появиться уже видимая сумма невидимых углов $-0,0001^\circ \cdot 100 \text{ раз} = 0,01^\circ$. (До 99 раза на фазометре всё по прежнему $000,00^\circ$, а на 100-ый раз на табло вдруг появляется $000,01^\circ$ - «т.е. как бы солнце взошло»). Этим подтверждается наличие точного значения невидимого, рассчитанного по формуле УФС, которому можно верить. Комиссия, схватив идею «Пуск» проверяет всё сама - делают 5 раз процесс суммирования до «появления солнца». Из 5 процессов получили: 1 раз - 100 нажатий, 2 раз - 98 нажатий, 3 раз - 102 нажатия, 4 раз - 99 нажатий, 5-раз - 100 нажатий. Итого 499 нажатий. В среднем 99,8 нажатий – погрешность *получения* $0,01^\circ - 0,00996$, что в пересчёте на $0,000^\circ$ даёт погрешность $0,00004^\circ$. Используя известный в частотометрии «принцип единиц и нулей», т.е. оставляя первоначальное значение $0,0001^\circ$, добавляют более высокие разряды $0,001^\circ$ затем $0,01^\circ$, а далее $0,0011; 0,0111; 0,1111$. Это дало на табло Ф2-34 $0,01; 0,11; 1,11; 11,11^\circ$. Комиссия улыбается, этому способу верим, давайте другие частоты. На частоте 1 МГц был применён компенсационный метод измерений (рис.7.б) с волновой линией задержки ВЛЗ и нуль-индикатора НИ (тот же фазометр Ф2-34, чувствительность которого была повышена за счёт умножения фазы в 100 раз с помощью компаратора частоты (КЧ) типа Ч7-5). УФС, например $1,11^\circ$ на входе КЧ выводится на табло Ф2-34 уже как $111,11^\circ$. Была проведена проверка и вторым способом. На частоте 1 МГц длине волны 300 м соответствует расстояние 300 м и УФС = 360° . Расстоянию в 1 м соответствует УФС $360/300 = 1,2^\circ$, соответственно 1 см – УФС $1,2/100 = 0,012^\circ$. Методика состояла в следующем: плунжер ВЛЗ ставят на нули, обнуляют шкалу НИ, затем вводят плунжер на 1 см. А на табло программы счётчика Ф5264 устанавливают цифры, исходя из расчёта УФС по формуле (3), где $\varphi = 0,012^\circ$, $F_{\text{вых}} = 1 \text{ МГц}$, $\theta = 10001$. Вводят этот сдвиг, и по шкале НИ определяют недо- или пере-компенсацию. Погрешность в среднем не превышает $0,00028^\circ$. На частоте 100 кГц исследования проводились с помощью фазометра типа ФК2-35 с разрешением в $0,001^\circ$ и макета прибора – компаратора угла фазового сдвига автоматизированного КУФСА-1 с разрешением $0,0001^\circ$ по 6 измерениям в каждой точке диапазона $0-360^\circ$ с шагом через $10,000^\circ$. [КУФСА-1 была создана Красноярским Политехническим институтом в лаборатории М.К. Чмыха по ТЗ НПО «ВНИИМ им.Д.И. Менделеева» в течении 1986-1988 гг.]. Число импульсов в программном счётчике было записано согласно расчёта по формуле (3) $\theta = 8333331$. Прибор ФК2-35 везде показывал значения через 10° с тремя нулями, а макет КУФСА-1 с погрешностью $0,0003-0,0007^\circ$.

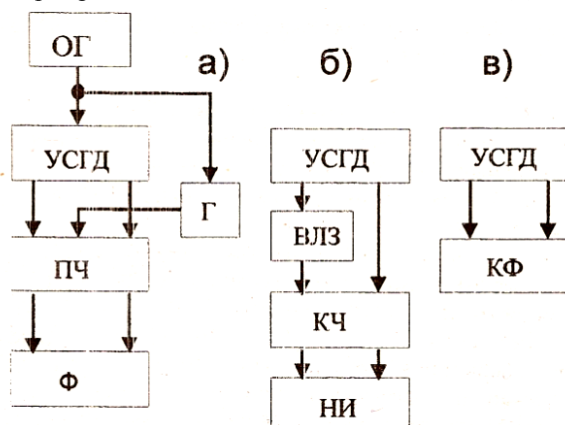


Рис.6. Структурные схемы методов аттестации УСГДЧ

6. Исходная мера УФС на частоту 1000 Гц

При создании измерительного 2-х фазного генератора (ИДГ) для ИМ на диапазон низких и инфранизких частот используется тип измерительного преобразования «частота – временной сдвиг – фазовый сдвиг». Это преобразование нашло применение в связи с тем, что достигнутый в настоящее время минимальный уровень погрешностей составляет диапазон значений 0,0003 – 0,001° в диапазоне частот 1-200 кГц. Ранее известные преобразования «частота – фазовый сдвиг» обеспечивали снижение погрешности до 0,01-0,005°, что позволяет создавать рабочие эталоны 1-го разряда. Основной недостаток устройств с таким преобразованием, отсутствие малой дискретности приращений УФС, например, она составляет 10° и 30° для калибратора фазы Ф1-4 и 0,1° и 1° для калибратора Ф5224 в зависимости от частотного диапазона. В ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» преодолели этот недостаток в исходной мере на частоту 1000 Гц, построенной на основе преобразования «временной сдвиг – УФС» [7].

Сигнал с выхода синтезатора частоты 1 с частотой ω_c (рис. 7) поступает на формирователь синусоидального сигнала 4, представляющий собой узкополосный усилитель напряжения, формирующий сигнал необходимой амплитуды с малым содержанием гармоник. С другого выхода синтезатора частоты снимается сигнал фиксированной частоты Ω , поступающий на вход источника временных сдвигов 2, управляемый устройством управления 3.

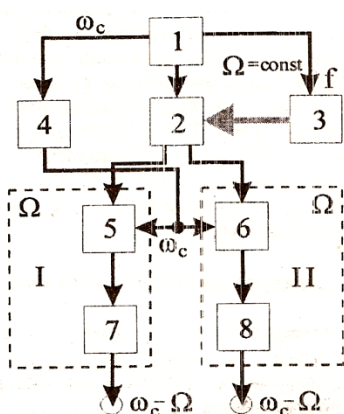


Рис.7. Блок-схема генератора на 1000Гц.

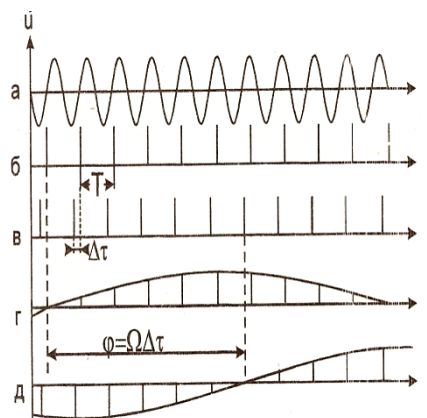


Рис.8. Временные диаграммы генератора

С выхода источника временных сдвигов 4 короткие импульсы поступают на электронные ключи (прерыватели) 5 и 6, а с их выходов сигналы поступают на входы фильтров нижних частот 7 и 8 с верхней частотой пропускания ω_c . Рассмотрим кратко процессы, происходящие в описываемом генераторе. Пусть на сигнальные входы ключей 5 и 6 поступает гармонический сигнал (рис. 8,а) $u_{ax} = U \sin \omega_c t$, а на их управляющие входы поступают короткие импульсы с частотой Ω (рис.8,б и 8,в). Тогда на выходах ключей будут иметь место сигналы с амплитудно-импульсной модуляцией (рис.8,г). Если положить длительность коммутирующих импульсов бесконечно малыми, то спектр сигнала на выходе ключа можно представить в виде:

$$S(j) = \left(\frac{1}{T}\right) \cdot S_o(j_c - n\Omega), \tag{5}$$

где T -период следования коммутирующих импульсов; $S_c(j)$ огибающей при $n = 0$, ω_c – угловая частота моделирующего сигнала; Ω - угловая частота коммутирующих импульсов $cm(U_{a,b,e,z,d})$. Так как моделирующим является гармонический сигнал, то его спектр может быть представлен как:

$$So\left\{\left(0, 5U_o^2(\omega_c)\right)\right\}, \tag{6}$$

где U_o - амплитуда модулирующего сигнала. С учётом (6) спектр модулированной импульсной последовательности может быть записан как:

$$S1(j) = (1/2T)Uo^2(c - n\Omega). \tag{7}$$

Предположим, что в канале II коммутирующие импульсы задержаны с помощью источника временных сдвигов по оси времени на время Δt (рис. 8,в) относительно коммутирующих импульсов канала I. При этом $0 \leq \Delta t \leq 2\pi/\Omega$. Согласно теореме сдвига спектр импульсной последовательности может быть описан выражением

$$S(j) = (2\pi/n) \cdot \Sigma \delta(c - n) e^{j \delta t}, \tag{8}$$

Спектр этой импульсной последовательности (рис.8,в), модулированный сигналом со спектром, описываемым как и для канала I, выражением (6), представим в виде (рис.8,в)

$$S(j\omega) = (U^2/2T) \cdot \Sigma \delta(\omega_c - n\Omega) e^{j \delta \Delta t}$$

Модулированные последовательности поступают на фильтры нижних частот блоков 7 и 8 с одинаковой полосой пропускания. В результате на выходах имеем сигналы:

$$U_{\text{вых1}}(t) = U_{m1} \sin \omega_c t \quad \text{и} \quad U_{\text{вых2}}(t) = U_{m2} \sin (\omega_c t + \Omega \tau),$$

Здесь $\omega_c = (\omega_c - \Omega)$. Таким образом, фазовый сдвиг между выходными сигналами будет равен:

$$\varphi = \Omega t \tau = 360^\circ t / T,$$

где $T=1,2,3$ и др. число диапазонов шага угла фазового сдвига при проходе фазы от 0 до 360° с шагом через $0,0001^\circ, 0,001^\circ, 0,01^\circ, 0,1^\circ, 1^\circ, 10^\circ$ в зависимости от диапазонов временных длительностей и одинаков для всего диапазона частот двух фазного генератора при условии, что постоянной составляющей, вносимой не идентичностью фильтров нижних частот, пренебрегаем. Погрешность задания приращений УФС определяется в основном, погрешностью задания временного сдвига. При использовании в качестве источника временных сдвигов серийного прибора – измерителя временных интервалов типа И1-8, имеющего разрешение по времени в $0,1 \text{ нс}$ (100 пс), получены следующие метрологические и технические характеристики исходного генератора для частоты 1000 Гц : Диапазон частот от $0,01$ до 1000 Гц , диапазон задаваемых УФС от 0 до 360° , дискретность задаваемых УФС - $0,001^\circ$, суммарная погрешность задаваемых УФС от $0,0001 - 0,001^\circ$, Режимы работы – ручной, автоматический, программный.

В качестве источника напряжения сигнала используется серийный синтезатор частоты типа Ч6-31, от которого берутся две частоты $\omega_c = 1000 \text{ кГц}$ и $\Omega = 1000 \text{ кГц} - 36 \text{ кГц} = 964 \text{ кГц}$. Эти две частоты делятся двухканальным делителем частоты типа Ф5093 в 36 раз, что соответственно даёт значения $27,777777$ и $26,777777 \text{ кГц}$. Сигнал частотой $27,777777 \text{ кГц}$ прямоугольной формы типа «меандр» поступает на вход измерителя временных интервалов типа И1-8, с двух выходов которого (фазопостоянного и фазопеременного) сигналы подаются на один из двух входов каждого из двух формирователей выходного сигнала. На второй из двух входов этих двух формирователей поступает синусоидальный сигнал частоты $26,777777 \text{ кГц}$, отфильтрованный из меандра до уровня коэффициента гармоник, равного $0,03\%$. На выходах формирователей выходного сигнала получаются два синусоидальных сигнала с частотой $27,777777 - 26,777777 = 1000 \text{ Гц}$. УФС между ними может изменяться двумя независимыми путями, а именно декадными ступенями через 10° в диапазоне от 0 до 360° и через $0,0001^\circ$ в диапазоне от 0° до 10° . Шкала t временных и фазовых сдвигов соответствуют друг другу следующим образом: $1 \text{ мс} - 360^\circ$, $1 \text{ мс} / 36 = 27,777777 \text{ мкс} - 10^\circ$; $2,7777 \text{ мкс} - 1^\circ$; $277,7 \text{ нс} = 0,1^\circ$; $27,7 \text{ нс} - 0,01^\circ$; $2,7 \text{ нс} - 0,001^\circ$, $1 \text{ нс} - 0,00037^\circ$; $0,1 \text{ нс} - 0,000036^\circ$. Генератор на частоте 1000 Гц может работать в ручном, в автоматическом от внутреннего самозапуска и в программном режиме от ЭВМ.

7. Исходная мера УФС на частоту $0,01 \text{ Гц}$

Метод воспроизведения УФС на инфранизких частотах, в частности на частоте- $0,01 \text{ Гц}$ относительно прост с учётом появления компьютеров. Сигнал от эталона частоты СЧВ-74 поступает на входы управляемого и неуправляемого делителей частоты, кодовые выходы которых поступают на цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) в первом и втором каналах. В управляемом делителе с помощью кодового управления в момент ввода УФС меняются состояния постоянно бегущих (изменяющихся) кодовых сигналов, чем и осуществляется изменение фазы сигнала на выходе: ЦАП. УФС может принимать значения $\varphi = K \cdot 360 / m$, где m – коэффициент деления делителей частоты $K = 0, 1, 2, 3, \dots, m-1$ ряд целых чисел. Между выходными клеммами включён измеритель УФС, связанный с персональным компьютером и который по общему каналу пользования (КОП) передаёт сигналы отработки фазовой информации, задаваемой персональным компьютером с тем, чтобы через время на запоминание результата ($10-12$ секунд) получить следующий шаг для воспроизведения УФС между двумя электрическими напряжениями. Персональный компьютер учитывает возможные уходы УФС из-за разных причин, например, от воздействия тепловых колебаний окружающей среды, влияющей на частотоподающие элементы схемы калибратора фазы, для внесения их в последующий шаг корректирующего изменения. Это обеспечивает снижение погрешности до $0,003^\circ$ во всём диапазоне УФС от 0 до 360° .

8. Рабочие эталоны УФС

Рабочими эталонами единицы УФС 1-го разряда является аппаратура, выпускаемая серийно на приборостроительных заводах страны, прошедшая аттестацию в институтах Росстандарта (РФ) и используемая по назначению по обеспечению единства измерений в стране путём поверки рабочих средств измерений (РСИ) на соответствие паспортным данным. Рабочие эталоны 1-го разряда (калибраторы фазы типа Ф5224 и Ф1-4) в сумме перекрывают диапазон частот от $0,001 \text{ Гц}$ (период $16,6$ минут) до 10 МГц . Калибратор фазовых сдвигов типа Ф5224 имеет диапазон $0,001 \text{ Гц} - 200 \text{ кГц}$ при погрешности по фазе $0,05 - 0,1^\circ$. Он выпускался Киевским заводом «ЗИП», больше не выпускается, но этих приборов ещё много и они часто приходят в поверку в Центры метрологии РФ. Калибратор фазы типа Ф1-4 имеет диапазон частот от 5 Гц до 10 МГц при погрешностях от $0,03$ до $0,1^\circ$ – детище Краснодарского завода «КЗРИП».

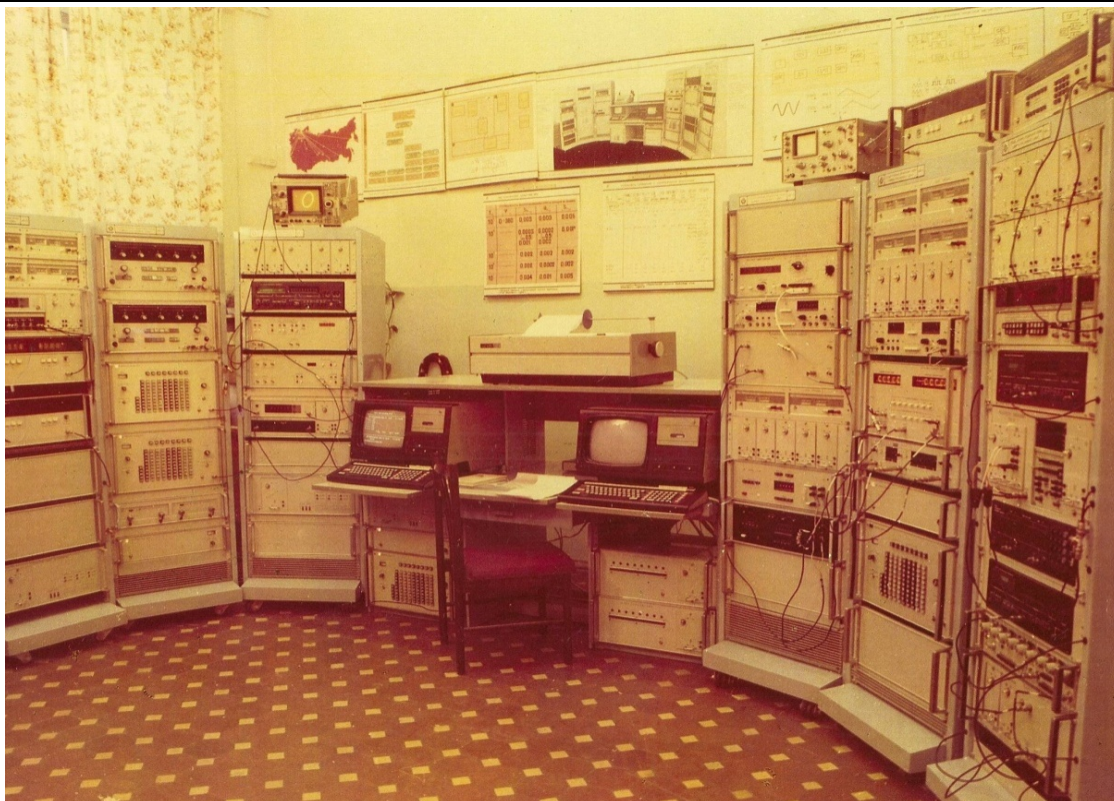


Рис. 9. Вид ГосЭталона единицы УФС в области фазометрии ГЭТ 61-88

Он сейчас не выпускается, но со склада ещё продают образцы этого прибора. Завода «КЗРИП» уже нет. Вместо этого мощного завода с серийным производством есть несколько научно-технических фирм по разработкам и выпуску радиоэлектронной измерительной аппаратуры на современной микросхемной базе и новых методах, опирающихся на компьютерные технологии. Так аппаратура в области вольтметрии предмет деятельности фирмы «Ритм». По фазометрии действует фирма ОАО «Мера», которая продолжила направление по созданию метрологической современной аппаратуры – калибраторов фазы и фазометров.



Рис. 10. Калибратор фазы типа Н6-2

Вместо Ф1-4 выпускается калибратор фазы типа Н6-2 (разработка 2013г.) Принцип действия - это синтезатор частоты всего лишь на 4-х современных микросхемах с диапазоном частот 1 Гц -100МГц с диапазоном УФС 0 – 360° и погрешностями: поддиапазон 1 Гц-100кГц – $\Delta\varphi = 0,01^\circ$; поддиапазон 100кГц -1 МГц – $\Delta\varphi = 0,02^\circ$; поддиапазон 1 МГц-10МГц – $\Delta\varphi = 0,03^\circ$; поддиапазон 10МГц-20 МГц – $\Delta\varphi = 0,15^\circ$; поддиапазон 20 МГц - 50 МГц – $\Delta\varphi = 0,25^\circ$ поддиапазон 50 МГц-100 МГц – $\Delta\varphi = 0,5^\circ$. Вес прибора 3 кг, размеры 317x132x288мм. Энергопотребление – 30 Вт от сети 220 В.

Прежние приборы были существенно более тяжёлые. Так Ф1-4 – вес 15 кг, размеры 488x220x385мм. Энергопотребление 120 Вт от сети 220 В.

Предполагаемый к выпуску измеритель разности фаз типа Ф2-41 с диапазоном частот 1 Гц- 100МГц имеет вес и габариты, как у Н6-2, а погрешности пока уточняются, т.к. прибор ещё не вышел из стадии заводских испытаний.

Литература

1. Галахова О.П. Основы фазометрии / О.П. Галахова, Е.Д.Колтик, С.А.Кравченко. – Ленинград, ГосЭнергоиздат. – 1976. – 278 с.
2. P.S.I. Phase Standard 800A (Frequens 4Hz, 50Hz, 400Hz, 1 kHz, Precision phase Angle 0,05°), Prosser Scientific Instruments LTD, 1985.
3. R.S. Turgel. A precision Phase Angle calibration Standard for frequency up to 50 kHz / IEEE Trans. and Instrum. and Measurement, Vol. No 4. December, 1985. pages 509-516.
4. Авт. свид. № 1596271. Исходная мера единицы угла фазового сдвига между двумя электрическими напряжениями./ Авторы: С.А.Кравченко, Е.Д.Колтик, И.Х.Шохор / Бюл. изобр. и тов. знаков СССР, 1990г. № 36.
5. Авт. свид. № 1337818. Способ дискретного задания фазовых сдвигов в широком диапазоне частот. / Авторы: В.В.Фоменков, С.А.Кравченко / Бюл. изобр. и тов. знаков СССР 1987, №34.
6. Патент Российской Федерации, НПО «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» RU № 202488/ k1/C1, 5, G01R 25/04/Калибратор фазы. / Авторы заявители и патентообладатели: С.А.Кравченко, В.В.Фоменков, И.Х.Шохор, С.О.Красавина, Зарегистрировано в Госреестре изобр. и тов. знаков СССР № 15. 1994г.
7. Авт.свид. № 1087921 Низкочастотный калибратор фазы. / Авторы: В.Е.Новодерёжкин, Ю.И.Казимов / Бюл. изобр. и тов. знаков СССР 1984, №15.
8. Сапельников В.М. Фазовращатели, Калибраторы фазы, Эталоны фазового сдвига, Фазовые измерения в радионавигации / В.М. Сапельников, С.А. Кравченко, М.К. Чмых, В.И. Кокорин, А.А. Газизов, А.С. Глинченко, А.М. Алёшечкин. Уфа, РИЦ УГНТУ, 2014г. 276с.

References

1. O.P.Galakhova, E.D.Koltik, S.A.Kravchenko. Osnovy fazometrii, Leningrad, GosEnergoizdat, 278s. 1976.
2. P.S.I.Phase Standard 800A (Frequens 4Hz, 50Hz, 400Hz, 1 kHz, Precision phase Angle 0,05°), Prosser Scientific Instruments LTD, 1985.
3. R.S.Turgel. A precision Phase Angle calibration Standard for frequency up to 50 kHz // IEEE Trans. and Instrum. and Measurement, Vol. No 4. December, 1985. pages 509-516.
4. Avt. свид. No 1596271. Iskhodnaja mera edinicy ugla fazovogo sdviga mezdy dvumja electicheskimi naprjazhjenijami./ Avtory: S.A.Kravchenko, E.D.Koltik, I.H.Shohor / Bjul. izobr. i tov. znakov SSSR, 1990.,No 36.
5. Avt. свид No 1337818. Sposob diskpnetnogo zadaniya vazovyh sdvigov v shirokom diapazone chastot./
6. Avtory: V.V.Fomenkov, S.A.Kravchenko / Bjul. izobr. i tov. znakov SSSR, 1987, No 34.
7. Patent Rossijskoi Federacii, NPO «VNIIM im. D.I. Mendeleeva» RU No 202488/ k1/C1, 5, G01R 25/04 / Kalibrator fazy./ Avtory zajaviteli i parentoobladaneli: S.A.Kravchenko, V.V.Fomenkov, I.H.Shokhor, S.O.Krasavina, Zaregistrirvano v Gosreestre izobr. i tov. znakov SSSR No 15. 1994.
8. Avt. свид. No 1087921 Nizkochastotny kalibrator fazy. / Avtory: V.E.Novoderezhkin, J.I.Kasimov / Bjul. izobr. i tov. znakov SSSR 1984, No 15.
9. V.M.Sapelnikov, S.A.Kravchenko, M.K.Chmyh, V.I.Kokorin, A.A.Gazizov, A.S. Glinchenko, A.M. Aleshechkin, / Fazovraschateli, Kalibratory fazy, Etalony fazovogo sdviga, Fazovyie izmereniya v radionavigacii. Ufa,RIZ UGNTU, 2014. 276s.

Рецензія/Peer review : 25.1.2016 р.

Надрукована/Printed :24.3.2016 р.