

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ ФАЗОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Л. Р. Григорьян¹, Н. М. Богатов¹, Р. Л. Григорьян²

¹Кубанский государственный университет, г. Краснодар

²ООО Научно-производственная фирма «Мезон», г. Краснодар

В работе проанализированы основные параметры фазоизмерительной аппаратуры, характеризующие предельную точность фазовых методов измерения:

- основная погрешность при равных уровнях исследуемых сигналов;
- амплитудно-фазовая погрешность при неравных уровнях исследуемых сигналов.

Аппаратурным метрологическим обеспечением при определении данных составляющих погрешностей являются:

— разработанный микроконтроллерный двухфазный калибратор фазы на базе DDS-генераторов, точность задания фазовых сдвигов которого в частотном диапазоне до 1 МГц составляет сотые доли градуса;

— калиброванный аттенюатор Д2-31 с фиксированными значениями ослабления в 10 дБ, собственная фазовая погрешность которого на частоте 1 МГц не превышает 0,03°.

Приведенные характеристики аппаратуры метрологической аттестации в целом свидетельствуют о возможности обеспечения нормативно-заданных параметров фазоизмерительной аппаратуры.

Ключевые слова: измерение, фазовые методы, частота, погрешность, точность, проверка.

Для цитирования: Григорьян Л. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л. Методы и аппаратура метрологической аттестации фазоизмерительной техники // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 111–117. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-111-117. EDN: XFLFCI.



© Григорьян Л. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODS AND EQUIPMENT FOR METROLOGICAL CERTIFICATION OF PHASE-MEASURING EQUIPMENT

L. R. Grigoryan¹, N. M. Bogatov¹, R. L. Grigoryan²

¹Kuban State University, Krasnodar, Russia

²LLC Scientific and Production Firm "Mezon", Krasnodar, Russia

The paper analyzes the main components characterizing the accuracy of phase measurement methods:

- basic error, at equal levels of the signals under study;
- amplitude-phase error at unequal levels of the signals under study.

The hardware for determining these error components is:

— a developed microcontroller two-phase phase calibrator based on DDS generators, the accuracy of setting phase shifts of which in the frequency range of up to 1 MHz is hundredths of a degree;

— a calibrated attenuator D2-31 with fixed attenuation values of 10 dB, providing a phase error at a frequency of 1 MHz of no more than 0,03°.

Keywords: measurement, phase methods, frequency, error, accuracy, verification.

For citation: Grigoryan L. R., Bogatov N. M., Grigoryan R. L. Methods and equipment for metrological certification of phase-measuring equipment. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 111–117. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-111-117. EDN: XFLFCI.



© Grigoryan L. R., Bogatov N. M., Grigoryan R. L., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

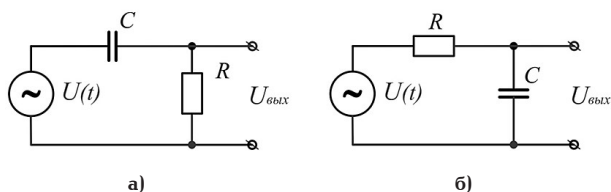


Рис. 1. Принципиальные схемы дифференцирующей (а) и интегрирующей (б) RC цепочки

Fig. 1. Schematic scheme of differentiating (a) and integrating (b) RC circuits

Введение

Понятие фазы, как определение, характеризует состояние колебательного процесса в заданный момент времени. Применимо к гармоническим колебаниям $U = U_m \sin(\omega t + \phi)$, где аргумент $(\omega t + \phi)$ является математической фазой.

В измерительном аспекте кроме фазы $(\omega t + \phi)$ вводятся понятия угловой частоты ω и максимальной амплитуды U_m гармонического сигнала [1–3].

Определив параметры гармонического сигнала, можно приступить к количественной их оценке. При этом надо заметить, что наиболее сложной процедурой по сравнению с измерениями амплитудных и частотных параметров является оценка фазового параметра [4]. Объясняется это тем, что фаза является «внутренним» параметром, как бы замаскированным амплитудой и частотой исследуемого сигнала [5].

При метрологической аттестации фазоизмерительной техники различают фазовую погрешность при равных и неравных уровнях исследуемых сигналов.

В первом случае погрешность обозначают как основную, а во втором — как амплитудно-фазовую. Соответственно, аппаратным обеспечением оценки данных фазовых составляющих погрешностей являются:

- калибраторы фазы, точность задания фазового сдвига которых определяет в целом основную фазовую погрешность;

- аттенуатор, собственная фазовая погрешность которого обеспечивает необходимую точность оценки амплитудно-фазовой погрешности фазоизмерительной аппаратуры.

Определив цель и содержание данной работы, последующий анализ проведем отдельно для двух обозначенных составляющих погрешностей.

1. Измерение основной погрешности при аттестации фазоизмерительной техники осуществляется, как правило, с использованием образцовых мер фазового сдвига. Некоторым исключением является метод самопроверки с использованием неградуированных фазовращателей. В дальнейшем этот метод исследовался в работе [6] и в настоящее время практически не используется.

Впервые применение образцовых мер фазового сдвига было предложено в работе [7] при создании фазового сдвига на калиброванной частоте с использованием фазовращателя, состоящего из отдельных радиоэлектронных компонентов (конденсаторов и резисторов).

Однако вследствие жестких требований, предъявляемых к стабильности частоты сигнала и к элементам фазосдвигающей цепочки, данный способ проверки не получил распространения.

Более перспективным направлением следует признать применение RC-элементов при использо-

вании свойства инвариантности в дифференцирующем и интегрирующем режимах их применения [8].

Коэффициенты передачи K_A , K_H и фазовые сдвиги дифференцирующей и интегрирующей RC-цепочки (рис. 1) определяются выражениями [9]:

$$K_A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}}, \quad \phi_A = \arctg\left(\frac{1}{\omega RC}\right), \quad (1)$$

$$K_H = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad \phi_H = -\arctg(\omega RC). \quad (2)$$

Используя соотношение

$$\arctg(\tau) - \arctg\left(\frac{1}{\tau}\right) = 90^\circ, \quad (3)$$

запишем: $\phi_A - \phi_H = 90^\circ$.

При $\omega_0 = 1/RC$ коэффициенты передачи цепочки одинаковы, а создаваемые ими фазовые сдвиги равны по модулю:

$$K_A(\omega_0) = K_H(\omega_0) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \phi_A(\omega_0) = |\phi_H(\omega_0)| = 45^\circ. \quad (4)$$

В работе [9] приведены структурные схемы и рассмотрены основные составляющие погрешности предлагаемого способа проверки аппаратуры.

Ограничения данного метода очевидны, но по сравнению с методом самопроверки его применение позволило оценить реальную погрешность серийно выпускаемых фазометров Ф2-16, Ф2-17 при фиксированном эталонном фазовом сдвиге 90° .

Задача метрологического обеспечения фазоизмерительной аппаратуры в полном объеме успешно была решена только при создании калибраторов фазы на основе разработанных двухфазных генераторов [10–12].

Началом развития этого направления следует считать работу [13], в которой изложены базовые принципы реализации структуры цифрового двухфазового генератора синусоидальных сигналов.

Дальнейшим развитием этого направления следует считать структуру [14], в которой решена задача радикального повышения точности задания фазового сдвига выходного напряжения регулируемого канала относительно опорного.

Практической реализацией данного направления является серийно выпускаемый калибратор фазы Ф1-4, предназначенный для воспроизведения углов фазового сдвига между двумя гармоническими сигналами в диапазоне частот от 5 Гц до 10 МГц и с точностью в пределах сотых долей градуса [15].

Существенным недостатком рассматриваемых структур калибраторов фазы является их реализация на основе применения цифровых элементов жесткой логики [16].

Дальнейшее развитие этого направления стало возможным с развитием микроэлектроники и появлением сверхбольших интегральных схем в широком номенклатурном диапазоне [17], что позволило оптимизировать структуру цифровых двухфазных генераторов [18, 19]. Одним из направлений этой оптимизации является применение ортогональных фазовых структур как в части воспроизведения

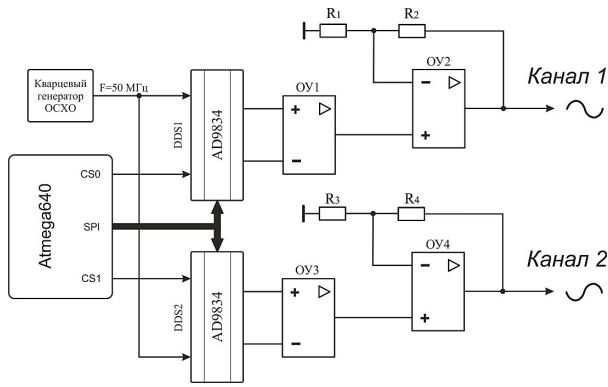


Рис. 2. Функциональная схема двухфазного генератора
Fig. 2. Functional scheme of a two-phase generator

фазовых сдвигов, так и измерения разности фаз между двумя гармоническими сигналами в широком частотном диапазоне [20, 21].

Применено к рассматриваемой задаче анализа основной погрешности фазоизмерителей техники на рис. 2 представлена функциональная схема двухканального генератора с регулируемым фазовым сдвигом между каналами.

Отличительными особенностями представленной схемы являются:

- применение двух DDS-генераторов AD9834 [22] в качестве задающего двухканального источника сигналов;
- синхронизация обоих DDS-генераторов от одного высокостабильного кварцевого источника сигналов ОСХО;
- использование общего источника питания $\pm U$ для обоих DDS-генераторов;
- синхронизация от единого микроконтроллера ATmega640;
- симметричность и идентичность схмотехники выходных каналов двухфазного генератора, построенных на прецизионных операционных усилителях AD8032 и AD8031.

Экспериментальная проверка данного источника калиброванных фазовых сдвигов подтвердила следующие его технические характеристики:

- частотный диапазон сигналов от 10 Гц до 10 МГц;
- динамический диапазон выходного сигнала ± 2 В;
- разрешающая способность воспроизведения фазовых сдвигов $\pm 0,01^\circ$.

Из анализа приведенных характеристик следует возможность его использования при проверке основной погрешности фазометров класса $0,1^\circ$ в диапазоне частот до 10 МГц.

2. Рассмотрим далее аппаратные методы оценки фазоамплитудной погрешности фазоизмерительной техники.

Фазоамплитудную погрешность определяют методом «аттенюатора» путем сличения фазоамплитудной характеристики каждого канала проверяемого прибора с фазоамплитудной характеристикой образцового аттенюатора, в качестве которого используется набор до семи штук последовательно соединенных аттенюаторов типа Д2-31. Фазоамплитудную погрешность определяют отдельно для каждого канала прибора по структурной схеме проверки, приведенной на рис. 3.

Измерение проводят на нижней, средней и верхней частотах с использованием генератора Г4-164

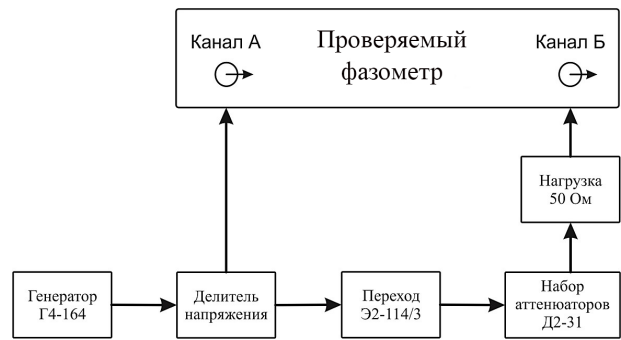


Рис. 3. Структурная схема проверки фазоамплитудной погрешности
Fig. 3. Structural scheme of phase-amplitude error verification

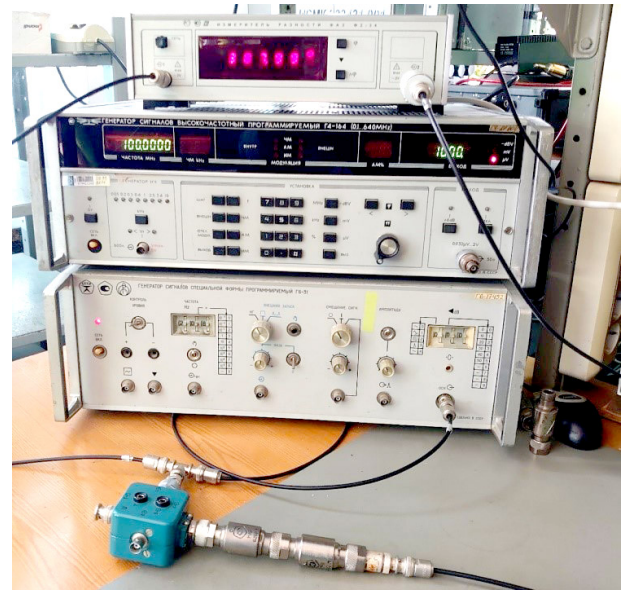


Рис. 4. Используемые приборы при измерении фазоамплитудной погрешности
Fig. 4. Devices used to measure phase-amplitude error

и набора аттенюаторов Д2-31 с фиксацией показаний проверяемого прибора Φ (рис. 4) и оценки его фазоамплитудной погрешности по формуле (5):

$$\Delta\phi = \Phi \pm a, \quad (5)$$

где a — фазовый сдвиг, вносимый аттенюаторами Д2-31.

При этом экспериментальные исследования серийно-выпускаемых фазометров Ф2-34 показывают, что фазоамплитудная погрешность исследуемых приборов нелинейно зависит от величины ослабления сигнала. Например, значение погрешности при ослаблении на 60 дБ может быть сравнима со значением погрешности при меньших ослаблениях сигнала. Для устранения этого эффекта проверку необходимо производить последовательно при ослаблениях 10, 20, 30, 40, 50 и 60 дБ.

При определении фазоамплитудной погрешности методом «аттенюатора» возникает погрешность рассогласования $\Delta\phi_p$, обусловленная влиянием емкости каналов фазометра. Для исключения этого эффекта в схему проверки погрешности фазометра введены развязывающие аттенюаторы с общим ослаблением 16 дБ.

Таблица 1. Фазовый сдвиг аттенюаторов Д2-31
Table 1. Phase shift of attenuators D2-31

№ аттенюатора	Ослабление аттенюатора, дБ	Фазовый сдвиг, φ' , °	$\varphi_i - \varphi_{ср}$, °
9586	9,98	9,0	-0,15
38036	10,07	9,0	-0,15
38085	10,16	9,2	+0,05
9594	10,07	9,1	-0,05
38026	10,02	9,4	+0,25
16749	10,1	9,1	-0,05
38096	10,07	9,1	-0,05
38077	10,11	9,3	+0,15
38035	10,13	9,2	+0,05

При входной емкости не более 30 пФ применение развязывающих аттенюаторов уменьшает ее влияние до значений $\Delta\varphi_p = 0,15^\circ$ на частотах 10 МГц и $\Delta\varphi_p = 0,015^\circ$ на частоте 1 МГц.

Рассмотрим далее влияние на точность поверки аттенюаторов Д2-31, которые представляют собой широкополосные резистивные аттенюаторы с полочной рабочей частотой от 0 до 2 ГГц [23].

При этом фазовый сдвиг вносимый данными аттенюаторами на частотах до 100 МГц прямо пропорционален частоте сигнала и определяется его электрической длиной и фазоамплитудной погрешностью резистивного делителя, которая пренебрежительно мала [24]. В табл. 1 приведены результаты исследования фазовых параметров заводской партии аттенюаторов Д2-31 в количестве 9 штук на частоте 100 МГц с использованием установки для проверки аттенюаторов ДК1-12, выполненных Нижегородским научно-исследовательским приборостроительным институтом. Из анализа данных табл. 1 следует, что фазовый сдвиг аттенюаторов Д2-31 на частоте 100 МГц находится в пределах $\varphi' = (9,2 \pm 0,3)^\circ$.

Учитывая, что собственная погрешность установки ДК1-12 на частоте 100 МГц минимальна и не превышает $\Delta\varphi_{уст} = \pm 1^\circ$, результирующее значение фазового сдвига аттенюатора на частоте 100 МГц определяется величиной $\Delta\varphi = (9,2 \pm 1,3)^\circ$.

С учетом изложенного погрешность задания фазовых сдвигов с использованием аттенюаторов Д2-31 определяется выражением:

$$\Delta\varphi_{ам} = \Delta\varphi_p + \Delta\varphi_f \cdot n,$$

где $\Delta\varphi_p$ — погрешность рассогласования за счет $C_{вх}$ фазометра; $\Delta\varphi_f$ — погрешность определения фазового сдвига аттенюатора на частоте f ; n — число аттенюаторов.

Тогда погрешности $\Delta\varphi_{ам}$ при ослаблении 10, 20, 30, 40, 50 и 60 дБ на частоте 10 МГц будут равны $\pm 0,27^\circ$, $\pm 0,39^\circ$, $\pm 0,51^\circ$, $\pm 0,63^\circ$, $\pm 0,75^\circ$, $\pm 0,87^\circ$, а на частоте 1 МГц равны $\pm 0,03^\circ$, $\pm 0,04^\circ$, $\pm 0,05^\circ$, $\pm 0,06^\circ$, $\pm 0,075^\circ$, $\pm 0,09^\circ$. Учитывая, что значение погрешности задания фазового сдвига с помощью аттенюаторов Д2-31 не превышает 20 % от нормируемой фазоамплитудной погрешности прибора, использование аттенюаторов Д2-31 в качестве образцовой меры при определении фазоамплитудной погрешности допустимо.

3. Экспериментальная проверка рассматриваемых аппаратных методов метрологической аттестации фазометров была проведена при поверке

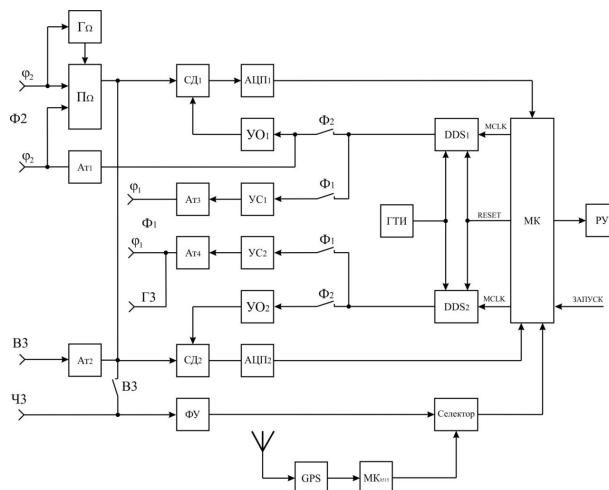


Рис. 5. Структурная схема универсального анализатора параметров сигналов
Fig. 5. Structural scheme of the universal signal parameter analyzer



Рис. 6. Анализатор параметров сигналов АПС-01
Fig. 6. Signal parameter analyzer APS-01

серийно выпускаемых фазометров Ф2-34 в количестве трех штук (приборов). Основной вывод из проведенной метрологической аттестации заключается в том, что измеренные значения как основной, так амплитудно-фазовой погрешности соответствуют паспортным значениям проверяемой партии приборов Ф2-34, что означает корректность предложенных как методов, так и аппаратуры метрологической аттестации фазоизмерительной техники.

При детальном рассмотрении структуры двухканального фазового генератора можно заметить, что он содержит как элементы генерации сигналов (DDS-генераторы), так и программно-вычислительный элемент (микроконтроллер) с регистрирующим устройством для визуализации управленческих функций, что открывает при дополнении его структуры элементами измерения параметров сигналов (синхронными детекторами) возможности создания универсального измерительного прибора с набором измерительных функций востребованных при метрологической оценке параметров фазовой аппаратуры [25, 26].

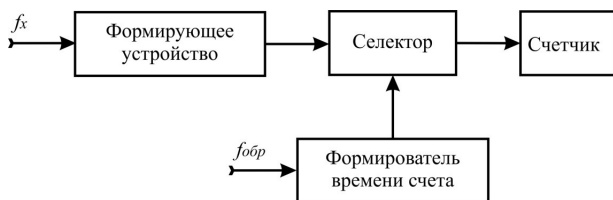


Рис. 7. Схема измерения частоты
Fig. 7. Frequency measurement scheme

Концепция предлагаемого универсального измерительного прибора включает [27]:

- в режиме генерации сигналов генераторы группы ГЗ и фазовые калибраторы группы Ф1;
- в режиме измерения параметров сигналов фазометры группы Ф2, вольтметры группы ВЗ и частотомеры группы ЧЗ.

Структурная схема универсального измерительного прибора и внешний вид опытного образца приведены на рис. 5 и на рис. 6 соответственно.

Из анализа структурной схемы прибора следует, что основными измерительными его блоками являются:

- генераторный блок, структурная схема которого приведена на рис. 2;
- измерительный блок, построенный по схеме ортогонального оптимального приемника сигналов на основе синхронных детекторов [26];
- блок измерения частоты, структурная схема которого приведена на рис. 7.

Функциональная схема генераторного блока приведена на рис. 2 и рассмотрена при анализе его применения для проверки основных погрешностей фазометра.

Отличительной особенностью измерительного блока является реализация ортогонального преобразования сигналов на базе двух ключевых синхронных детекторов и 24 разрядного сигма-дельта АЦП. Выходы аналого-цифровых преобразователей подключены к микроконтроллеру, а входы усилителей-ограничителей — к выходам синтезаторов DDS. Такая реализация ортогонального преобразования обеспечивает исключение методической погрешности измерения фазы сигнала при соответствующем тактовом алгоритме измерения.

Отличительным признаком блока измерения частоты, реализованного по методу сравнения измеряемой частоты f_x с известной образцовой частотой $f_{обр}$, является применение в качестве образцовых сигналов 1 PPS спутниковой Глонавс/GPS системы. Данный сигнал поступает на вход формирователя времени счета, на выходе которого формируется интервал времени Δt , устанавливаемый равным 10^m , где m — целое число, принимающее значение от 2 до -3 .

Сигнал измеряемой частоты f_x поступает на формирующее устройство, преобразующее данный сигнал в последовательность импульсов. С выхода формирующего устройства импульсы поступают на временной селектор, на второй вход которого поступает сигнал заданного временного интервала Δt . Подсчет импульсов, попадающих в интервал Δt , осуществляется цифровым устройством по формуле $n = \Delta t \cdot f_x$, из которой определяется значение частоты f_x .

В заключение отметим, что взаимодействие приведенных электронных блоков осуществляет-

ся через коммутационные элементы, управляемые в свою очередь сигналами с программно-вычислительного блока (микроконтроллера).

Заключение

Проведенный анализ как существующих, так и перспективных решений, используемых в практике метрологической аттестации фазоизмерительной аппаратуры, позволил сформулировать следующие основные выводы и положения:

1. Точность фазоизмерительной аппаратуры характеризуется двумя составляющими погрешностями:

- основной, при равных уровнях исследуемых сигналов;
- амплитудно-фазовой при неравных уровнях исследуемых сигналов.

2. Аппаратурным обеспечением при определении данных составляющих погрешностей являются:

- двухфазные генераторы с калиброванным фазовым сдвигом между выходными сигналами;
- калиброванные аттенюаторы Д2-31 с фиксированным значением ослабления 10 дБ.

3. В качестве калибратора фазы авторами предложено использовать разработанный микроконтроллерный двухфазный генератор на базе DDS-генераторов AD9834, точность задания фазовых сдвигов которых в частотном диапазоне до 1 МГц составляет сотые доли градуса.

4. Аттестация аттенюаторов Д2-31 с использованием установки ДК1-12 обеспечивает фазовую точность на частоте 1 МГц, не превышающую 0,03°, что вполне достаточно при оценке амплитудно-фазовой погрешности серийно выпускаемых фазометров Ф2-34.

5. Предложенная авторами структура двухканального генератора сигналов открывает возможности создания универсального измерительного прибора с широким набором измерительных функций.

Список источников / References

1. Галахова Ф. П., Колтик Е. Д., Кравченко С. А. Основы фазометрии. Ленинград: Энергия, 1976. 256 с.
Galakhova F. P., Koltik E. D., Kravchenko S. A. Osnovy fazometrii [Fundamentals of phase measurement]. Leningrad, 1976. 256 p. (In Russ.).
2. Огородничук Л. Д. Классификация методов фазометрии диапазонов высоких частот // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2007. Т. 50, № 12. С. 49–65. EDN: KUZFYF.
Ogorodnichuk L. D. Klassifikatsiya metodov fazometrii diapazonov vysokikh chastot [Classification of phase measurement methods of high frequency ranges]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika. 2007. Vol. 50, no. 12. P. 49–65. EDN: KUZFYF. (In Russ.).
3. Патюков В. Г. Основы частотно-временных измерений: моногр. Красноярск: Изд-во СФУ, 2014. 166 с. ISBN 978-5-7638-3136-8.
Patyukov V. G. Osnovy chastotno-vremennykh izmereniy [Fundamentals of time-frequency measurements]. Krasnoyarsk, 2014. 166 p. ISBN 978-5-7638-3136-8. (In Russ.).
4. Ким К. К., Анисимов Г. Н., Чураков А. И. Средства электрических измерений и их поверка. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 316 с.
Kim K. K., Anisimov G. N., Churakov A. I. Sredstva elektricheskikh izmereniy i ikh poverka [Electrical measuring instruments and their verification]. Saint Petersburg, 2021. 316 p. (In Russ.).

5. Лукашкин В. Г., Булатов М. Ф. Эталоны и стандартные образцы в измерительной технике. Москва: Техносфера, 2018. 402 с. ISBN 978-5-94836-512-1.
- Lukashkin V. G., Bulatov M. F. Etalony i standartnyye obraztsy v izmeritel'noy tekhnike [Standards and standard samples in measuring technology]. Moscow, 2018. 402 p. ISBN 978-5-94836-512-1. (In Russ.).
6. Поздняков И. К. Разработка и исследование методов и образцовой аппаратуры для измерения угла сдвига фаз: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1963. 134 с.
- Pozdnyakov I. K. Razrabotka i issledovaniye metodov i obraztsovoy apparatury dlya izmereniya ugla sdviga faz [Development and research of methods and exemplary equipment for measuring the phase shift angle]. Leningrad, 1963. 134 p. (In Russ.).
7. Смирнов П. Т. Образцовый фазовращатель для поверки электронных фазометров КФ-1 (Ф2-1) // Измерительная техника. 1974. Вып. 4.
- Smirnov P. T. Obraztsovy fazovrashchatel' dlya poverki elektronnykh fazometrov KF-1 (F2-1) [Model phase shifter for testing electronic phase meters KF-1 (F2-1)]. Izmeritel'naya tekhnika. *Measurement Techniques*. 1974. Issue 4. (In Russ.).
8. А. с. 600473 СССР, МПК G01R25/00. Способ оценки погрешности измерителей разности фаз / Э. В. Маграчев, Р. Л. Григорьян, В. Г. Нудьга; заявл. 26.03.1976; опубл. 06.12.1977, Бюл. № 12.
- A. s. 600473 SSSR, IPC G01R25/00. Sposob otsenki pogreshnosti izmeriteley raznosti faz [Method of evaluating errors of phase difference meters] / E. V. Magrachev, R. L. Grigoryan, V. G. Nudga. (In Russ.).
9. Григорьян Р. Л., Маграчев Э. В., Нудьга В. Г. Способ оценки погрешности фазометров с помощью неаттестованных фазосдвигающих мер // Техника средств связи. Серия: Радиоизмерительная техника. 1976. Вып. 6. С. 1–10.
- Grigoryan R. L., Magrachev E. V., Nud'ga V. G. Sposob otsenki pogreshnosti fazometrov s pomoshch'yu neattestovannykh fazosdvigayushchikh mer [Method for estimating the error of phasometers using untested phase-shifting measures]. *Tekhnika sredstv svyazi. Seriya: Radioizmeritel'naya tekhnika*. 1976. Issue 6. P. 1–10. (In Russ.).
10. Вязигин И. О. Расчет статистических параметров погрешности алгоритма измерения угла сдвига фаз // Вопросы радиоэлектроники. 2008. Т. 1, № 2. С. 103–110. EDN: NXXUEV.
- Vyazigin I. O. Raschet statisticheskikh parametrov pogreshnosti algoritma izmereniya ugla sdviga faz [Calculation of statistical error parameters of the phase shift angle measurement algorithm]. *Voprosy radioelektroniki. Questions of Radio Electronics*. 2008. Vol. 1, no. 2. P. 103–110. EDN: NXXUEV. (In Russ.).
11. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Москва: Солон-Пресс, 2021. 540 с. ISBN 978-5-91359-250-7.
- Afon'skiy A. A., Dyakonov V. P. Izmeritel'nyye pribory i massovyye elektronnyye izmereniya [Measuring instruments and mass electronic measurements]. Moscow, 2021. 540 p. ISBN 978-5-91359-250-7. (In Russ.).
12. Баженов Н. Р., Мыльников А. В., Малай И. М. Новые задачи метрологического обеспечения измерений параметров радиотехнических сигналов // Альманах современной метрологии. 2019. № 2 (18). С. 23–36. EDN: WIOCAT.
- Bazhenov N. R., Myl'nikov A. V., Malay I. M. Novyye zadachi metrologicheskogo obespecheniya izmereniy parametrov radiotekhnicheskikh signalov [New tasks of metrological assurance of measurements of parameters of radiotechnical signals]. *Al'manakh sovremennoy metrologii. Almanac of Modern Metrology*. 2019. No. 2 (18). P. 23–36. EDN: WIOCAT. (In Russ.).
13. Асеев Б. П. Фазовые соотношения в радиотехнике. 3-е изд., доп. Москва: Связьиздат, 1959. 304 с.
- Assev B. P. Fazovyye sootnosheniya v radiotekhnike [Phase relations in radio engineering]. 3rd ed., suppl. Moscow, 1959. 304 p. (In Russ.).
14. А. с. 599335 СССР, МПК H03K3/80. Цифровой двухфазный генератор синусоидальных сигналов / Р. Л. Григорьян, Н. В. Маслов, О. К. Шалдыкин; заявл. 14.12.1976; опубл. 28.11.1977, Бюл. № 11.
- A. s. 599335 SSSR, IPC H 03 K 3/80. Tsifrovoy dvukhfaznyy generator sinusoidal'nykh signalov [Digital two-phase sinusoidal signal generator] / R. L. Grigoryan, N. V. Maslov, O. K. Shaldykin. (In Russ.).
15. А. с. 1525614 СССР, МПК G01R25/04. Широкополосный калибратор фазовых сдвигов / Р. Л. Григорьян, В. Ф. Егоров, С. В. Федорченко; заявл. 15.12.1987; опубл. 01.08.1989, Бюл. № 44.
- A. s. 1525614 SSSR, MPK G01R25/04. Shirokopolosnyy kalibrator fazovykh sdvigov [Broadband phase shift calibrator] / R. L. Grigoryan, V. F. Egorov, S. V. Fedorchenko. (In Russ.).
16. Калибратор фазы Ф1-4. ХВ2.085.010 ТУ. Краснодар, 1980. 312 с.
- Kalibrator fazy F1-4 [Phase calibrator F1-4]. ХВ2.085.010 ТУ. Krasnodar, 1980. 312 p. (In Russ.).
17. Клаассен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / пер. с англ. Е. В. Воронова, А. Л. Ларина. Москва: Постмаркет, 2000. 352 с. ISBN 5-901095-02-2.
- Klaassen K. B. Osnovy izmereniy. Elektronnyye metody i pribory v izmeritel'noy tekhnike [Fundamentals of measurement. Electronic methods and devices in measuring technology] / trans. from Engl. E. V. Voronov, A. L. Larin. Moscow, 2000. 352 p. ISBN 5-901095-02-2. (In Russ.).
18. Мелентьев В. С., Иванов Ю. М., Павленко Е. В. Анализ погрешности средства измерения параметров гармонических сигналов // Южно-Сибирский научный вестник. 2015. № 1 (9). С. 67–71. EDN: TPEXSZ.
- Melentyev V. S., Ivanov Yu. M., Pavlenko E. V. Analiz pogreshnosti sredstva izmereniya parametrov garmonicheskikh signalov [Analysis of error of measuring the harmonic signals parameters]. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik. South-Siberian Scientific Bulletin*. 2015. No. 1 (9). P. 67–71. EDN: TPEXSZ. (In Russ.).
19. Боровский А. С., Булатов В. Н., Соловьев Н. А. Спектрально-дискретный метод воспроизведения фазы колебаний // Датчики и системы. 2016. № 12 (209). С. 21–26. EDN: XHFJUZ.
- Borovskiy A. S., Bulatov V. N., Solovyev N. A. Spektral'no-diskretnyy metod vosproizvedeniya fazy kolebaniy [Spectral-discrete method of reproducing phase fluctuations]. *Datchiki i sistemy. Sensors and Systems*. 2016. No. 12 (209). P. 21–26. EDN: XHFJUZ. (In Russ.).
20. Азаркин Д. Г., Бахтин В. Н., Бычков Н. В. [и др.]. Три метода независимой поверки измерителей ослабления и фазового сдвига на промежуточной частоте // Измерительная техника. 2008. № 12. С. 41–43. EDN: MVJXTF.
- Azarkin D. G., Bakhtin V. N., Bychkov N. V. [et al.]. Tri metoda nezavisimoy poverki izmeriteley oslableniya i fazovogo sdviga na promezhutochnoy chastote [Three methods for independently checking instruments for measuring attenuation and phase shift at an intermediate frequency]. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2008. No. 12. P. 41–43. EDN: MVJXTF. (In Russ.).
21. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О. Проектирование электронных измерительных приборов. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 240 с. ISBN 978-5-9729-1518-7.
- Bondar O. G., Brezhneva E. O. Proyektirovaniye elektronnykh izmeritel'nykh priborov [Design of electronic measuring instruments]. Moscow, 2023. 240 s. ISBN 978-5-9729-1518-7. (In Russ.).
22. Direct Digital Synthesis (DDS). *Analog Device*. URL: <https://www.analog.com/en/dds/index.html> (accessed: 20.03.2025).
23. Д2-31 — аттенуатор резистивный фиксированный 10 Дб. ТУ: ЕЭ0.224.066. Великие Луки, 1972. 7 с.

D2-31 — attenuator rezistivnyy fiksirovanny 10 Db. [D2-31 — fixed resistive attenuator 10 dB]. TU: EE0.224.066. Velikiye Luki, 1972. 7 p. (In Russ.).

24. МИ 1672-87. Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Фазометры электронные. Методика поверки. Введ. 1988-07-01. Москва: Изд-во стандартов, 1988. 33 с.

МИ 1672-87. Metodicheskiye ukazaniya. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Fazometry elektronnyye. Metodika poverki [MI 1672-87. Methodical instructions. State system for ensuring uniformity of measurements. Electronic phase meters. Verification procedure.]. Moscow, 1988. 33 p. (In Russ.).

25. Григорьян Л. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л. Новые схемотехнические решения в практике коммутационных фазовых измерений // Перспективные технологии в средствах передачи информации — ПТСПИ'2021: материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2021. 307—310 с. EDN: QUFGKP.

Grigor'yan L. R., Bogatov N. M., Grigor'yan R. L. Novyye skhemotekhnicheskiye resheniya v praktike kommutatsionnykh fazovykh izmereniy [New schematical solutions in the practice of commutation phase measurements]. Perspektivnyye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii — PTSPI'2021. *Perspective Technology in Means of Information Transfer — PTMIT-2021*. Vladimir, 2021. 307—310 p. EDN: QUFGKP. (In Russ.).

26. Земцов А. Н. Об эффективности разложения сигналов с помощью ортогональных преобразований // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2012. № 2-2. С. 129—135.

Zemtsov A. N. Ob effektivnosti razlozheniya signalov s pomoshch'yu ortogonal'nykh preobrazovaniy [On the efficiency of signal decomposition using orthogonal transformations]. Informatsionnyye tekhnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii. *Information Technology. Radio Electronics. Telecommunications*. 2012. No. 2-2. P. 129—135. (In Russ.).

27. Григорьян Л. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л. Аппаратурная реализация фазовых анализаторов с ортогональным преобразованием сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2022. № 4. С. 21—28. EDN: WONBKS.

Grigoryan L. R., Bogatov N. M., Grigoryan R. L. Apparaturnaya realizatsiya fazovykh analizatorov s ortogonal'nyim preobrazovaniyem signalov [Hardware implementation of phase analyzers with orthogonal signal conversion]. Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv. *Design and Technology of Electronic Means*. 2022. No. 4. P. 21—28. EDN: WONBKS. (In Russ.).

ГРИГОРЬЯН Леонтий Рустемович, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика и информационные системы» Кубанского государственного университета (КубГУ), г. Краснодар.
SPIN-код: 5577-2862
AuthorID (РИНЦ): 303618

AuthorID (SCOPUS): 56108945200

Адрес для переписки: leonmezon@mail.ru

БОГАТОВ Николай Маркович, доктор физико-математических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Физика и информационные системы» КубГУ, г. Краснодар.

SPIN-код: 3221-6389

AuthorID (РИНЦ): 18064

ORCID: 0000-0002-9301-4545

AuthorID (SCOPUS): 6603914657

ResearcherID: P-7314-2015

Адрес для переписки: bogatov@phys.kubsu.ru

ГРИГОРЬЯН Рустем Леонтьевич, кандидат технических наук, исполнительный директор, ООО Научно-производственная фирма «Мезон», г. Краснодар.

Адрес для переписки: mezon_kub@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 18.04.2025; одобрена после рецензирования 09.06.2025; принята к публикации 27.06.2025.

GRIGORYAN Leonty Rustemovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Physics and Information Systems Department, Kuban State University (KubSU), Krasnodar.

SPIN-code: 5577-2862

AuthorID (RSCI): 303618

AuthorID (SCOPUS): 56108945200

Correspondence address: leonmezon@mail.ru

BOGATOV Nikolay Markovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Physics and Information Systems Department, KubSU, Krasnodar.

SPIN-code: 3221-6389

AuthorID (RSCI): 18064

ORCID: 0000-0002-9301-4545

AuthorID (SCOPUS): 6603914657

ResearcherID: P-7314-2015

Correspondence address: bogatov@phys.kubsu.ru

GRIGORYAN Rustem Leontievich, Candidate of Technical Sciences, Executive Director, LLC Scientific and Production Company "Mezon", Krasnodar.

Correspondence address: mezon_kub@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 18.04.2025; approved after reviewing 09.06.2025; accepted for publication 27.06.2025.