

Государственный первичный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166-2020

Олег Викторович Каминский¹, Александр Вячеславович Мыльников^{2✉}, Иван Владимирович Могилев³,
Владимир Александрович Тищенко⁴

1, 2, 3, 4 Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹kaminsky@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5458-0042>

²lab203@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-4861-2415>

³mogilev@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7371-6937>

⁴otd200@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-001-6559-5170>

Аннотация. Описаны характеристики Государственного первичного эталона единицы девиации частоты ГЭТ 166-2020, методы и средства измерений девиации частоты. Для воспроизведения единицы девиации частоты реализован метод прямого цифрового синтеза сигнала. Данный метод исключает некоторые источники погрешностей измерений девиации частоты, что позволяет значительно расширить диапазоны несущих и модулирующих частот, а также увеличить в 10 раз максимальное воспроизводимое значение единицы девиации частоты без увеличения неисключённой систематической погрешности. В состав ГЭТ 166-2020 включены современные средства измерений на основе цифрового анализа сигнала – анализатор сигналов и цифровой запоминающий осциллограф, с помощью которых можно передавать единицу девиации частоты эталонным средствам измерений. Применение указанных средств измерений существенно расширяет возможности ГЭТ 166-2020. Область применения ГЭТ 166-2020 охватывает измерители модуляции, генераторы сигналов, измерительные приёмники, анализаторы спектра/сигналов, измерители фазового дрожания, анализаторы фазовых шумов, генераторы и анализаторы цифровых видов модуляции. Приведены экспериментальные результаты исследований ГЭТ 166-2020. Оценены частные составляющие погрешностей измерений четырёх независимых методов измерений, некоторые из составляющих погрешностей исключены или многократно уменьшены. Сопоставлены полученные каждым из методов результаты измерений. Сходимость результатов измерений единицы девиации частоты в пределах $\pm(0,02...0,05) \%$.

Ключевые слова: частотная модуляция, эталон, компаратор, калибратор, погрешность, единица девиации частоты, генератор сигналов, анализатор спектра

Для цитирования: Каминский О. В., Мыльников А. В., Могилев И. В., Тищенко В. А. Государственный первичный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166-2020 // Измерительная техника. 2022. № 4. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-4-3-7>

The state primary standard of the frequency deviation unit GET 166-2020

Oleg V. Kaminsky¹, Aleksandr V. Mylnikov^{2✉}, Ivan V. Mogilev³, Vladimir A. Tishenko⁴

1, 2, 3, 4 Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹kaminsky@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5458-0042>

²lab203@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-4861-2415>

³mogilev@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7371-6937>

⁴otd200@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-001-6559-5170>

Abstract. The article provides a description of specifications of the State primary standard of the frequency deviation, methods and means for measurement frequency deviation, which used at standard. A direct digital signal synthesis method has been implemented to reproduce the frequency deviation unit. This method is devoid of a number of sources of errors in measuring frequency deviation and allows you to significantly expand the ranges of carrier and modulating frequencies, as well as increase the maximum reproducible value of the frequency deviation unit by 10 times without increasing the non-excluded systematic error. The primary standard includes modern measuring instruments based on digital signal analysis - a signal analyzer and a digital storage oscilloscope, which allow transmitting a unit of frequency deviation to reference measuring instruments and significantly expand the capabilities of the primary standard. Are given experimental investigations results of improved standard. The scope of application of the State Primary Standard of the Frequency Deviation Unit GET 166-2020 is considered, covering modulation meters, signal generators, measuring

receivers, spectrum/signal analyzers, phase jitter meters, phase noise analyzers, generators and analyzers of digital modulation types. Experimental results of studies of GET 166-2020 are presented. The partial components of the measurement errors of the four independent measurement methods used are estimated, some of the components of the errors are excluded or reduced many times. Comparison of the measurement results by each of the methods used indicates the convergence of the measurement results of the frequency deviation unit within $\pm(0.02...0.05) \%$.

Keywords: frequency modulation, reference, comparator, calibrator, error, frequency deviation units, signal generator, spectrum analyzer

Введение. Государственный специальный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 105-76 создан в СССР в 1976 г. [1]. Одновременно введён в действие ГОСТ 8.232-77 «ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений девиации частоты». В 2004 г. для обеспечения единства измерений на территории страны создан Государственный первичный специальный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004 [2, 3] и поверочная схема для средств измерений (СИ) девиации частоты ГОСТ Р 8.607-2004 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений девиации частоты». В 2005 г. с применением ГЭТ 166-2004 поверено более 30 СИ, а в настоящее время количество поверяемых рабочих эталонов и высокоточных СИ приближается к 150.

За последнее десятилетие появились анализаторы сигналов и спектра с функцией измерения девиации частоты, анализаторы сигналов посадки и навигации, анализаторы фазовых шумов. Кроме того, получены экспериментальные результаты, подтверждающие возможность передачи единицы девиации частоты анализаторам цифровой модуляции (типа QAM, QPSK, BPSK).

Качественно изменился и парк поверяемых рабочих эталонов и высокоточных СИ. Рабочие эталоны пополнились

поверочными установками РЭДЧ-2 [4], измерителями модуляции СКЗ-50, СКЗ-50/1 [5], Boonton 8201, анализаторами спектра N9040B, R&S FSW8/13/26, R&S FSV7/13/30/40, эталонными установками K2-85 [6], калибраторами K2-101, SMBV-AM-FM, измерительными приёмниками FSMR, анализаторами спектра, SPN9026A, источникам опорными Fluke 96040A, Fluke 96270A и др. Технические характеристики новых СИ заметно превосходят характеристики ранее используемых. Заметно расширен диапазон несущих частот, увеличена точность измерений, диапазон измеряемых значений девиации частоты ряда приборов превысил 1 МГц, что больше максимального значения, воспроизводимого ГЭТ 166-2004.

Отношение между пределами допускаемой погрешности воспроизведения девиации частоты установок РЭДЧ-1, РЭДЧ-2 и неисключённой систематической погрешностью (НСП) ГЭТ 166-2004 составило менее 2:1. Это сдерживало дальнейшее увеличение точности поверочных установок аналогичного типа. Таким образом, увеличение точности ГЭТ 166-2004 стало актуальным.

Пути совершенствования и возможности модернизации ГЭТ 166-2004 на основе современных методов измерений изложены в [7]. В 2018 г. определены задачи по усовершенствованию ГЭТ 166-2004. Приказом Росстандарта от 6 мая 2020 г. № 864 «Об утверждении Государственного первичного эталона единицы девиации частоты» усовершенствованный эталон утверждён как Государственный первичный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166-2020.

Цель настоящей работы – описание возможностей ГЭТ 166-2020 и его метрологических характеристик (расширение диапазонов несущих и модулирующих частот, воспроизводимых значений девиации частоты, повышение точности).

Состав ГЭТ 166-2020. Эталон состоит из трёх калибраторов и двух компараторов девиации частоты для различных диапазонов частот. Функции калибраторов выполняют калибратор частотной и фазовой модуляции K2-96, генератор сигналов сложной/произвольной формы 81160A и эталонный калибратор-компаратор, который одновременно является компаратором. Вторым компаратором служит анализатор сигналов SPN 9026A. ГЭТ 166-2020 также содержит частотомер ЧЗ-64, осциллограф цифровой запоминающий HDO9404R-MS, персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ) и вспомогательное оборудование. Внешний вид ГЭТ 166-2020 представлен на рисунке.

Метрологические характеристики ГЭТ 166-2020. В табл. 1 приведены диапазон воспроизводимых эталоном пиковых значений девиации частоты Δf ,



Внешний вид первичного эталона ГЭТ 166-2020

Appearance of the primary standard GET 166-2020

Таблица 1

Диапазоны девиации частоты и модулирующих и несущих частот

Δf , кГц	F_m , кГц	f_0 , МГц
0,01–100,00	0,02–20,00	5
0,01–1000,00	0,02–200,00	50
0,01–10000,00 ($\Delta f \leq 0,2f_0$)	0,02–1000,00 ($F_m \leq 0,05f_0$)	0,09–250
1,0–10000	0,02–200,00	500; 1000; 2000; 4000

диапазон частот модулирующих сигналов F_m и несущие частоты f_0 .

ГЭТ 166-2020 обеспечивает воспроизведение девиации частоты со средним квадратическим отклонением S_0 результатов измерений, не превышающим $1 \cdot 10^{-4}$ при десяти независимых наблюдениях. НСП Θ является суммой мультипликативной составляющей Θ_m и аддитивной составляющей Θ_a . Значения Θ_m , Θ_a в зависимости от характеристик воспроизводимых частотно-модулированных сигналов приведены в табл. 2.

Принцип действия ГЭТ 166-2020. Каждый из калибраторов эталона воспроизводит частотно-модулированный сигнал с заданной девиацией частоты Δf . Все параметры сигнала устанавливает оператор, вводя данные с помощью персонального компьютера. К выходу калибратора подключают измеритель модуляции, например СКЗ-50, и единицу девиации частоты передают подключённому СИ. Если СИ представляет собой калибратор, например К2-101, К2-38, К2-85, то единица девиации частоты передаётся через эталонный компаратор. Для этого СИ в виде калибратора подключают к входу компаратора. Компаратор поочередно измеряет воспроизводимое эталонное значение Δf с девиацией частоты Δf_1 , сформированной поверяемым (калибруемым) СИ.

Два калибратора (эталонный калибратор-компаратор и калибратор К2-96) основаны на методе электронно-счётного частотомера, но различаются по диапазону несущих частот. Калибратор К2-96 содержит встроенный генератор модулирующего сигнала, который работает на любой произвольной частоте рабочего диапазона 20 Гц – 1 МГц, в то время как встроенный генератор модулирующего сигнала эталонного калибратора-компаратора воспроизводит значение девиации частоты на фиксированных частотах: 20; 30; 55; 400 Гц, 1; 6; 20; 30; 60; 100; 200 кГц. Кроме того, калибратор К2-96 имеет встроенный умножитель несущей частоты, позволяющий расширить диапазон воспроизводимых несущих частот. Дополнительные несущие частоты: 100; 250; 500; 1000; 2000; 4000 МГц.

Некоторые первичные эталоны [8, 9], а также ряд рабочих эталонов, построены на базе цифрового анализа сигналов. Цифровой синтез для эталонов девиации частоты ранее не применялся.

Особенностью калибратора в виде генератора сигналов сложной/произвольной формы 81160А является принцип действия, основанный на методе прямого цифрового синтеза.

Метод прямого цифрового синтеза. Суть метода прямого цифрового синтеза заключается в том, что выходной сигнал задаётся в виде цифрового массива данных, который преобразуется быстродействующим цифроаналоговым преобразователем в частотно-модулированный сигнал с заданными значениями параметров f_0 , F_m , Δf . Генератор сигналов 81160А имеет 14-разрядный преобразователь с тактовой частотой 2,5 ГГц, это позволяет воспроизводить частотно-модулированные сигналы в широких диапазонах несущих и модулирующих частот с достаточно низким уровнем искажений и шумов.

Таблица 2

Значения Θ_m , Θ_a в зависимости от характеристик воспроизводимых частотно-модулированных сигналов

f_0 , МГц	F_m , кГц	Θ_m , %	Θ_a , Гц
0,09–50	0,02–20,0	0,03	10
0,09–50	20–200	0,05	50
0,09–50	200–1000	0,05	250
50–250	20–200	0,05	50–250
500	20–200	0,05	600
1000	20–200	0,05	1000
2000	20–200	0,05	1800
4000	20–200	0,05	3000

Цифровой анализ. Используемый в ГЭТ 166-2020 компаратор в виде анализатора сигналов SPN9026А позволил одновременно расширить следующие диапазоны:

измеряемых значений девиации частоты 10 Гц – 10 МГц;
несущих частот 9 кГц – 26 ГГц (измерение девиации частоты);

модулирующих частот 20 Гц – 1,0 МГц.

Высокоскоростной цифровой запоминающий осциллограф HDO9404R-MS необходим для реализации метода экстремальных значений периода частотно-модулированного сигнала – независимого метода измерения девиации частоты, позволяющего подтвердить объявленную точность эталона и контролировать его стабильность.

Экспериментальные исследования. Для подтверждения метрологических характеристик ГЭТ 166-2020 проведены следующие исследования: анализ НСП Θ ; исследование составляющих погрешностей в расширенных диапазонах значений девиации частоты и несущих и модулирующих частот; сопоставление результатов измерений четырёх реализованных независимых методов измерения девиации частоты; исследование предельных возможностей новых цифровых методов синтеза и анализа частотно-модулированных сигналов.

При исследовании составляющих погрешностей сравнивали технические характеристики аналоговых и цифровых калибраторов девиации частоты. Первые результаты свидетельствовали о значительном вкладе шумовой составляющей цифровых калибраторов в НСП. Поэтому первоначально не предполагалось использовать калибратор на основе генератора сигналов сложной/произвольной формы 81160А для воспроизведения малых значений девиации частоты [7]. Однако в дальнейшем экспериментально доказано, что его шумовая составляющая меньше, чем шумовая составляющая аналогового калибратора К2-96.

Результаты исследований. Шумовую составляющую калибраторов девиации частоты измеряли анализатором сигналов, который имеет опцию аналоговой демодуляции и очень низкий уровень собственных фазовых шумов. Результаты измерений приведены в табл. 3 (СКЗ – среднее квадратическое значение). В полосах частот фильтров 0,3–600 кГц,

0,3–1000 кГц уровень шумов генератора 81160А больше, чем уровень шумов калибратора К2-96. Подробные исследования чистоты спектра генератора показали наличие паразитной составляющей сигнала 284 кГц, значение девиации составляет 22 Гц. Уровень паразитных составляющих достаточно мал, и он учитывается при нормировке аддитивной составляющей НСП Θ_a .

Составляющие погрешностей при воспроизведении единицы девиации частоты анализировали и ранее на основе результатов исследований первого в СССР эталона единицы девиации частоты ГЭТ 105-76 [10] и рабочих эталонов [11], опыта создания ГЭТ 166-2004 [2] и результатов, полученных при изучении цифровых методов синтеза и анализа частотно-модулированных сигналов.

Три составляющие погрешности (погрешность коэффициента деления делителя Δ_k , погрешность, вызванная гармоническими составляющими модулирующей частоты Δ_r , методическая погрешность Δ_m) существенно увеличиваются с увеличением модулирующей частоты. Именно поэтому погрешность Θ_m ГЭТ 166-2004 изменялась в диапазоне 0,05–0,15 % с увеличением модулирующей частоты. Предпринятые усовершенствования позволили в два раза уменьшить Θ_m ГЭТ 166-2020. В частности, уменьшена методическая погрешность Δ_m и погрешность Δ_d дискретности отсчёта частотомера в результате применения запоминающего цифрового осциллографа, временная разрешающая способность которого в 10000 раз превосходит разрешающую способность частотомера ЧЗ-64 из состава ГЭТ 166-2004. Методическая погрешность уменьшена примерно в 1000 раз. Это также позволило применять указанный метод для более высоких модулирующих частот (1 МГц).

Доминирующей составляющей для методов электронно-счётного частотомера и нулей функции Бесселя является погрешность Δ_r , обусловленная гармоническими составляющими модулирующей частоты. Источниками Δ_r являются гармоники

в сигнале модулирующего генератора и нелинейность модулятора. Независимые исследователи отмечают малый уровень гармоник частотно-модулированного сигнала генераторов, использующих метод прямого цифрового синтеза [12]. Как показали исследования [7], частотно-модулированный сигнал генератора сигналов 81160А имеет низкий уровень гармоник (менее 0,03 % при существовавшем в эталонном калибраторе-компараторе допуске до 0,2 %). Полностью исключена погрешность Δ_k , так как отсутствует делитель в генераторе сигналов 81160А. При измерении методом нулей функции Бесселя заметно уменьшились погрешности сопутствующей амплитудной модуляции $\Delta_{a,m}$, изменений модулирующей $\Delta_{m,c}$ и промежуточной $\Delta_{п,ч}$ частот за время измерения в результате применения генератора сигналов 81160А, имеющего кварцевый опорный генератор и анализатора сигналов SPN9026А, реализующего цифровой анализ сигнала.

Калибратор в виде генератора сигналов сложной/произвольной формы 81160А имеет диапазоны значений девиации частоты и модулирующих частот достаточные для сличений результатов измерений с любым из трёх других применяемых методов измерений. Метод электронно-счётного частотомера имеет необходимую точность измерения девиации частот только в диапазоне значений $\Delta f = 500 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^6$ Гц, метод измерения экстремальных значений периода частотно-модулированного сигнала – в диапазоне 1–10 МГц, а метод нулей функции Бесселя – только при фиксированных отношениях $\Delta f/F_m = 2,40; 5,52; \dots$. В ходе исследования характеристик ГЭТ 166-2020 доказана высокая сходимость результатов измерений используемыми методами. Относительная разность Δ (в процентах) между девиацией частоты Δf , установленной в генераторе 81160А, и измеренным различными методами значением Δf_i приведена в табл. 4 (НФБ – метод нулей функции Бесселя, ЭСЧ – метод электронно-счётного частотомера, Тэкст – метод измерения экстремальных значений периода частотно-

модулированного сигнала). Относительная разность Δ по модулю не превышает объявленного значения НСП Θ .

Поверочная схема утверждена приказом Росстандарта № 233 от 01.02.2022 г. «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений девиации частоты».

Заключение. Государственный первичный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166-2020 разработан на основе новейших цифровых технологий с использованием опыта разработок предыдущих эталонов и поверочных установок на основе аналоговых устройств.

Таблица 3

Уровни частотных шумов, Гц, на несущей частоте 50 МГц

Тип калибратора	Значение	Полоса частот фильтров, кГц						
		0,3–3	0,3–20	0,3–200	0,3–600	0,3–1000	0,3–2000	0,3–3000
81160А	Пиковое	6,2	9,3	26,8	134	280	660	1286
	СКЗ	0,77	1,03	5,4	30,7	50,1	122	227
К2-96	Пиковое	11,5	7,1	36,7	118	260	716	1430
	СКЗ	0,95	1,6	7,0	24,1	52,1	138	260

Таблица 4

Относительная разность значений Δ , %, измеренная различными методами

Δf , МГц	Метод	F_m , кГц										
		0,03	0,09	0,4	1,0	6,0	20	30	60	100	200	500
1–10	Тэкст	0,013	0,008	–0,014	–0,010	–0,015	0,018	0,007	0,002	–0,006	–0,002	–0,006
	НФБ	–	–	–	–	–	–	–	–0,022	–0,021	–0,020	–0,022
0,1–1	НФБ	–	–	–	–0,022	–0,022	–0,023	–0,022	–0,021	–0,021	–0,020	0,025
	ЭСЧ	–0,024	–0,023	–0,024	–0,024	–0,022	–0,024	0,024	–0,008	–0,026	0,008	–0,048

Точность созданного эталона достаточна для передачи единицы всем известным и вновь разрабатываемым СИ девиации частоты, а расширенные диапазоны частот охватывают как уже созданные, так и перспективные СИ.

Возможности ГЭТ 166-2020 в области единства измерений девиации частоты позволят обеспечить потребности страны в ближайшие 5–7 лет. Вместе с тем общее развитие цифровой модуляции требует новых подходов к прослеживаемости параметров сигналов сложных типов модуляции к ГЭТ 166-2020.

Список источников

1. Шпаньон П. А., Павленко Ю. Ф., Райхман А. Ф. и др. Государственный специальный эталон единицы девиации частоты // Измерительная техника. 1977. № 3. С. 3–6.
2. Мыльников А. В., Тищенко В. А. Государственный специальный эталон единицы девиации частоты // Измерительная техника. 2005. № 1. С. 36–39.
3. Государственный специальный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004 // В кн.: Российская Метрологическая Энциклопедия / Под ред. акад. В. В. Окрепилова. Том 1. СПб: ИИФ «Лики России», 2015. С. 566.
4. Болмусов Ю. Д., Мартынов В. А. Новые рабочие эталоны коэффициента амплитудной модуляции и девиации частоты высокочастотных колебаний // Метрология в радиоэлектронике: материалы XI науч.-техн. конф., Менделеево, 19–21 июня 2018 г., ФГУП «ВНИИФТРИ», т. 2. С. 184–190.
5. Болмусов Ю. Д., Мартынов В. А., Конов А. Ю., Поляков В. Е., Кожеватов Г. К., Чернов Д. Ю. Измерители модуляции нового поколения // Метрология в радиоэлектронике: Тез. докл. X науч.-техн. конф., Москва, 20–22 июня 2016 г., ФГУП «ВНИИФТРИ». С. 298–301.
6. Болмусов Ю. Д., Мартынов В. А., Скворцов Е. Л. Эталонные установки К2-83 и К2-85 для поверки и калибровки измерителей амплитудной и частотной модуляции // Вестник метролога. 2007. № 3. С. 32–36.
7. Могилев И. В., Мыльников А. В. Первичный эталон единицы девиации частоты. Новые возможности и перспективы // Измерительная техника. 2019. № 1. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-1-3-7>
8. Маневич В. З., Селин Л. Н. Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса $4 \cdot 10^{-11}$ – $1 \cdot 10^{-5}$ с // Измерительная техника. 2011. № 12. С. 6–11.
9. Платонов Ф. А., Ахромеева Е. О., Бабарыкин В. А., Пруго А. В., Безденежных С. В., Каминский О. В., Стальнова К. А. Государственный первичный эталон единицы коэффициента гармоник в диапазоне 0,001–100 % для сигналов с основной гармоникой в диапазоне частот 10–200000 Гц ГЭТ 188-2010 // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 3–6.
10. Павленко Ю. Ф., Шпаньон П. А. Измерение параметров частотно-модулированных колебаний. М.: Радио и связь, 1986, 77 с.

11. Болмусов Ю. Д., Мартынов В. А., Скворцов Е. Л., Куваева Н. В. Рабочий эталон единицы девиации частоты // Законодательная и прикладная метрология. 2002. № 3. С. 22–25.

12. Зенькович А. В., Балло В. Л., Добровольский В. Б. Измерение нелинейных искажений частотно-модулированных сигналов прямого цифрового синтеза // Измерительная техника. 2018. № 4. С. 43–48.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-4-43-48>

References

1. Span'on P. A., Pavlenko Y. F., Raikhman, A. F. et al., *Measurement Techniques*, 1977, vol. 20, pp. 1249–1252. <https://doi.org/10.1007/BF00817542>
2. Myl'nikov A. V., Tishchenko, V. A., *Measurment Techniques*, 2005, vol. 48, pp. 42–48. <https://doi.org/10.1007/s11018-005-0097-x>
3. The state special standard of the unit of frequency deviation GET 166-2004, in book: *Russian Metrological Encyclopedia*, Ed. by the RAS academician V. V. Okrepilov, vol. 1, St. Petersburg, IIF "Liki Rossii" Publ., 2015, p. 566. (In Russ.)
4. Bolmusov Yu. D., Martynov V. A., New working standards of the amplitude modulation coefficient and frequency deviation of high-frequency oscillations, *Metrology in radio electronics: materials of the XI Scientific and Technical conf.*, Mendeleev, June 19–21, 2018, FSUE "VNIIFTRI", vol. 2, pp. 184–190. (In Russ.)
5. Bolmusov Yu. D., Martynov V. A., Konnov A. Yu., Polyakov V. E., Kozhevato G. K., Chernov D. Yu. New generation modulation meters, *Metrology in radio electronics: Abstracts of Papers X Scientific-Technical Conference*, Moscow, June 20–22, 2016, FSUE "VNIIFTRI", pp. 298–301. (In Russ.)
6. Bolmusov Yu. D., Martynov V. A., Skvortsov E. L. Reference installations K2-83 and K2-85 for verification and calibration of amplitude and frequency modulation meters. *Vestnik Metrologa*, no. 3, 2007, pp. 32–36. (In Russ.)
7. Mogilev, I.V., Myl'nikov, A.V., *Measurment Techniques*, 2019, vol. 62, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01577-2>
8. Manevich V. Z., Selin L. N., *Measurment Techniques*, 2012, vol. 54, pp. 1319–1326. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9890-5>
9. Platonov F. A., Akhrameeva E. O., Babarykin V. A., Pruglo A. V., Bezdenzhnykh S. V., Kaminskii O. V., Stal'nova K. A., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, pp. 203–208. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0943-z>
10. Pavlenko Yu. F., Shpanyon P. A., *Measurement of the parameters of frequency-modulated oscillations*, Moscow, Radio and Communications, 1986, p. 77. (In Russ.)
11. Bolmusov Yu. D., Martynov V. A., Skvortsov E. L., Kuvaeva N. V. Working standard of the frequency deviation unit, *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, no. 3, 2002, pp. 22–25. (In Russ.)
12. Zen'kovich A. V., Ballo V. L., Dobrovol'skii V. B., *Measurment Techniques*, 2018, vol. 61, pp. 377–383. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1437-y>

Статья поступила в редакцию 16.02.2022; одобрена после рецензирования 28.02.2022; принята к публикации 11.03.2022.
The article was submitted 16.02.2022; approved after reviewing 28.02.2022; accepted for publication 11.03.2022.