

I. Радиотехнические измерения

УДК 621.376.2.

**РАЗВИТИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИЗМЕРЕНИЙ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ****А.В. Мыльников***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
lab203@vniiftri.ru*

Аннотация. Рассмотрены исторические аспекты развития измерений девиации частоты частотно-модулированного (ЧМ) сигнала, обоснована необходимость централизованной передачи единицы. Указан порядок передачи единицы девиации частоты от первичного эталона через рабочие эталоны к рабочим средствам измерений. Показаны особенности передачи единицы девиации в широком диапазоне частот, взаимосвязь с другими видами измерений. Изложены принцип действия и характеристики усовершенствованного первичного эталона единицы девиации частоты. Уделено внимание аналоговым и цифровым методам синтеза и анализа ЧМ сигнала.

Ключевые слова: частотная модуляция, девиация частоты, генераторы сигналов, калибраторы, приёмник, анализаторы спектра, радиотестеры, эталоны.

**DEVELOPMENT OF METROLOGICAL SUPPORT
FOR FREQUENCY DEVIATION MEASUREMENTS****A.V. Mylnikov***FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
lab203@vniiftri.ru*

Annotation. The historical aspects of the development of measurements of the frequency deviation of a frequency-modulated (FM) signal are considered, the need for a centralized transmission of the unit is substantiated. The procedure for transferring the unit of frequency deviation from the primary standard through working standards to working measuring instruments is indicated. The features of the transmission of the unit of deviation in a wide frequency range and the relationship with other types of measurements are shown. The principle of operation and characteristics of the improved primary standard of the unit of frequency deviation are described. Attention is paid to analog and digital methods of synthesis and analysis of the FM signal.

Key words: frequency modulation, frequency deviation, signal generators, calibrators, receiver, spectrum analyzers, radio testers, standards.

Современный эфир плотно заполнен различными потоками информации. Если в начале XX века предпринимались робкие попытки передать по радио минимальную информацию, то сейчас различными техническими средствами передаются и принимаются терабайты информации в виде радио- и телепередач, беспроводного интернета, мобильной связи, сигналов радиолокации, радионавигации, радиоуправления.

Для передачи такой информации через эфир в информационных технологиях используют различные виды модуляции: амплитудная, частотная, фазовая, импульсная, импульсно-кодовая, векторная и др. Классическими видами модуляции в радиотехнике являются амплитудная (АМ) и частотная (ЧМ). Появление именно этих видов модуляции связано с тем, что в математическом виде напряжение представляется в виде гармонических колебаний синусоидальной формы с амплитудой U и частотой ω :

$$U(t) = U \cdot \sin\omega t. \quad (1)$$

Однако такой сигнал не несёт в себе информации, его требуется изменить во времени, а в формуле (1) только два параметра: амплитуда U и частота $\omega = 2\pi f$. Исторически АМ появилась раньше ЧМ и других видов модуляции.

Следует отметить фундаментальное значение АМ и ЧМ как двух независимых видов модуляции, позволяющих описать другие существующие и гипотетические более сложные виды модуляции.

Для математического описания частотно-модулированных колебаний в соответствии с ГОСТ 16465-70 вводится понятие закона модуляции (или мгновенной частоты) $f(t)$, которая имеет постоянную составляющую f_0 (несущую или среднюю частоту) и переменную гармоническую составляющую $\Delta F(t) = \Delta f \cdot \sin 2\pi F_m t$. Амплитуда Δf этой переменной составляющей и называется девиацией частоты, то есть максимальное отклонение частоты от среднего значения. Девиация частоты Δf имеет размерность частоты и выражается в герцах. Параметр F_m называется модулирующей частотой. Именно эти два параметра Δf и F_m несут в себе передаваемую информацию. В радиоприёмнике ЧМ они превращаются в звук (F_m — звуковая частота; Δf — амплитуда звуковой частоты) или другую закодированную информацию.

Первоначально все радиоприёмники и радиостанции использовали только АМ, с освоением телевидения применение АМ расширилось.

ЧМ впервые была применена в мобильной связи в США. В нашей стране первый ЧМ передатчик появился для радиовещания в Москве в 1946 г.

В 70-х годах сложились стандартные диапазоны и ограничения, принятые при измерениях девиации частоты.

1. Частотная модуляция осуществляется по синусоидальному закону с определённой частотой F_m . Диапазон модулирующих частот 0,02–200 (300) кГц.
2. Коэффициент гармоник ЧМ сигнала не превышает 10 %.
3. Отношение несущей частоты к модулирующей не менее 50 : 1.
4. Диапазон несущих частот от 10 кГц до 30 ГГц.
5. Диапазон измеряемых значений девиации от 1 Гц до 1 МГц. Кроме того, предполагается, что спектр модулирующих частот (и их гармоник) ограничен частотой 200 кГц.

Измерители девиации частоты (девиометры) серийно выпускались уже в 70-х годах — это измерители СЗ-15, СКЗ-26, СКЗ-31, СЗ-32 и другие. Им на смену появились измерители девиации частоты СКЗ-39, СКЗ-40, СКЗ-41. Затем были выпущены достаточно большим тиражом измерители модуляции СКЗ-43, СКЗ-46 и измеритель модуляции вычислительный СКЗ-45. В настоящее время выпускаются измерители модуляции СКЗ-49, СКЗ-49/1, СКЗ-50, СКЗ-50/1. Измерители модуляции применяются для определения параметров генераторов сигналов, передатчиков и других устройств, использующих ЧМ сигнал. Большинство современных ВЧ- и СВЧ-генераторов имеют режим ЧМ. Именно в этих двух направлениях (генераторов и девиометров) сначала развивались отечественные средства измерений. Затем к ним добавились поверочные установки, калибраторы девиации частоты.

Среди импортных средств измерений девиации частоты также наиболее многочисленными являются генераторы сигналов с режимом ЧМ, но вместо измерителей модуляции последнее время применяются анализаторы спектра и анализаторы сигналов с опциями аналоговой демодуляции.

Классификация средств измерений девиации частоты наглядно представлена на рис. 1.

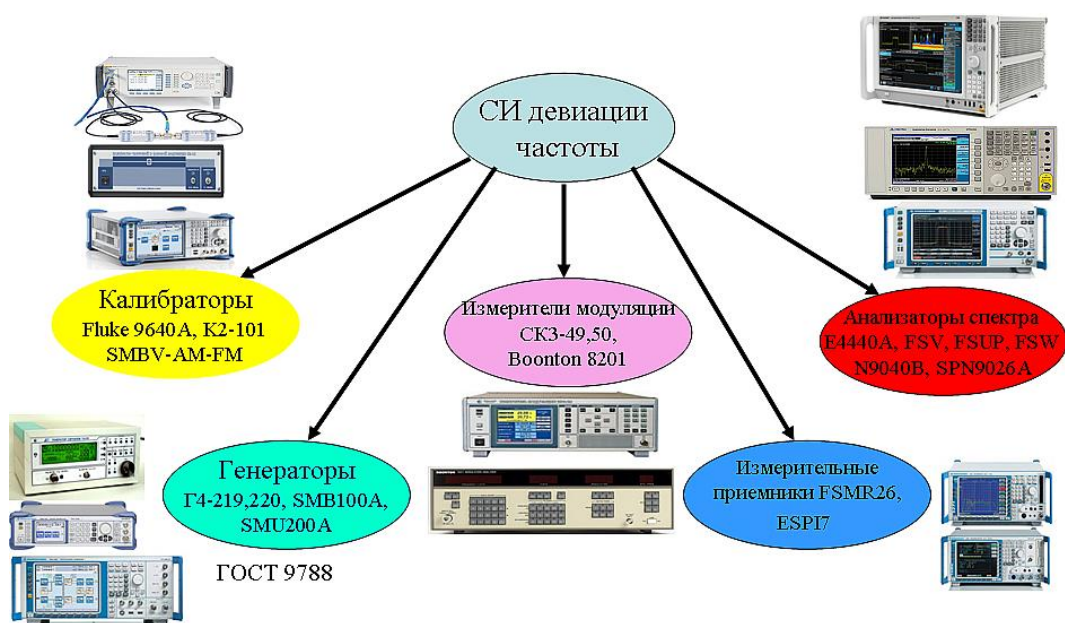


Рис. 1. Виды средств измерений девиации частоты

Средства измерений девиации частоты, встречающиеся на территории РФ, представлены в таблице 1.

Средства измерений девиации частоты

Средства измерений	Обозначение типа средства измерений
Генераторы сигналов	<p>Г4-80, 81, 82, 83; Г4-112; Г4-128,129; Г4-13; Г4-139; Г4-140; Г4-145, 146, 147; Г4-151; Г4-158А; Г4-164, 165; Г4-176; Г4-176А; Г4-192; Г4-196, 197, 198; Г4-200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210; Г4-218А, 219, 220; Г4-227; Г4-229, 230, 231, 232; РГ4-17-01.</p> <p>Е4400В; Е4420; Е4426В; Е4430; Е4431; Е4437В; Е8257D; Е8267D; N5183А; N5183В; N5171В; N5172В; N5173В; N5181В; N5182В; 8648А, В, С, D; 81150А; 81160А; 81180А; 83751А, В; 83752А, В фирмы «Keysight Technologies».</p> <p>MG 3692А, MG 3691С, MG 3694С фирмы «Anritsu Company».</p> <p>RFSG 2, 4, 6, 12, 20, 26 фирмы «AnaPico».</p> <p>SG 382, SG 384, SG 386 фирмы «SRSYS».</p> <p>SMC100А, SMA100А, SMB100А, SMF100А, MBV100А, SMJ100А, SMU200А, SMATE200А, HMF2525, HM8135 фирмы «Rohde & Schwarz»</p>
Измерители модуляции	СК3-39, СК3-40, СК3-41, СК3-43, СК3-45, СК3-46, СК3-49, СК3-49/1, СК3-50, СК3-50/1 «Boonton 8201», FAM, FMA, FMB
Поверочные установки	К2-38, К2-56, К2-85, РЭЕДЧ-1, РЭЕДЧ-2
Калибраторы	К2-101, К2-101ЧМ, Fluke 9640А, Fluke 96040А, Fluke 96027А
Приёмники измерительные	FSMR 4, 8, 26, 40, 50; ESPI 3, 7 фирмы «Rohde & Schwarz»; АМИР-ЧМ «ВНИИТР»
Анализаторы спектра	FPC1000; FPC1500; FSL 3, 6, 18; FPL1003, FSV 3, 7, 13, 30, 40; FSVA 3, 7, 13, 30, 40; FSW 4, 8, 26 фирмы «Rohde & Schwarz»; N9040В фирмы «Keysight Technologies». АКИП-4204/ТГ, АКИП-4207/1, GSP-79300В
Анализаторы сигналов	SPN9026А фирмы «Спектран», N9010А, N9020А, N9030А, N9040В, N9041В фирмы «Keysight Technologies»
Радиотестеры	СТН100А, СТН200А фирмы «Rohde & Schwarz», PCT-430 ИТЦ «Контур»

Ещё в 1976 г. для обеспечения единства и правильности измерений имевшегося парка средств измерений девиации частоты в СССР были введены в действие Государственный специальный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 105-76 и ГОСТ 8.232-77 на поверочную схему. Данная поверочная схема для рабочих эталонов предусматривала два разряда. В качестве эталонов 1-го разряда применялись поверочные установки К2-38, которым размер единицы девиации частоты передавался от эталона ГЭТ 105-76. От рабочих эталонов 1-го разряда он передавался измерителям модуляции (рабочим эталонам 2-го разряда), а затем рабочим средствам измерений — генераторам или измерителям девиации частоты [1]. Были приняты стандартные несущие частоты и сетка модулирующих частот, на которых осуществлялась передача размера единицы девиации частоты. Несущая частота 50 МГц оказалась наиболее удобной для передачи размера единицы, так как позволяла работать во всём диапазоне модулирующих частот (от 20 Гц до 200 кГц) и использовать метод электронно-счётного частотомера при опорном значении девиации частоты 1,0 МГц. Кроме несущей частоты 50 МГц, используются частоты 5 и 10 МГц.

Однако среди метрологов не было единого мнения о применении созданного в 1976 г. эталона ГЭТ 105-76. Бытовала концепция «децентрализованного воспроизведения единицы девиации частоты». В частности, методика поверки установки К2-38 предусматривает поэлементную поверку с экспериментальной оценкой частных составляющих погрешностей воспроизведения девиации частоты. Оцениваются частные составляющие погрешности из-за коэффициента гармоник, из-за отличий коэффициента деления делителя модулирующего напряжения от номинальных значений, из-за частотного шума и фона, из-за конечного значения промежуточной частоты.

Такая концепция имела некоторые основания. В основе первичного эталона и рабочих эталонов 1-го разряда лежал один и тот же принцип работы. Методики экспериментальной оценки частных составляющих погрешностей также были аналогичные, однако при этом в них имеется ряд уязвимых мест. Во-первых, при оценке влияния гармонических составляющих учитываются только 2-я и 3-я гармоники модулирующей частоты; во-вторых, учёт частотного шума и фона, выраженного в виде среднеквадратического значения девиации частоты, и других составляющих погрешностей, нормированных для пикового значения девиации, не всегда выполняется корректно. Но главное — это возможная неисправность компаратора-формирователя ЧМ импульсов на выходе «Частотомер» поверочной установки, которая не может быть обнаружена поэлементной поверкой. Применяемый в установках метод электронно-счётного частотомера [1] предусматривает формирование на выходе «Частотомер» ЧМ импульсов с последующим измерением среднего

значения частоты внешним частотомером. Осциллограмма ЧМ импульсов представлена на рис. 2, где в верхней части изображён модулирующий синусоидальный сигнал, а в нижней части — ЧМ импульсы.

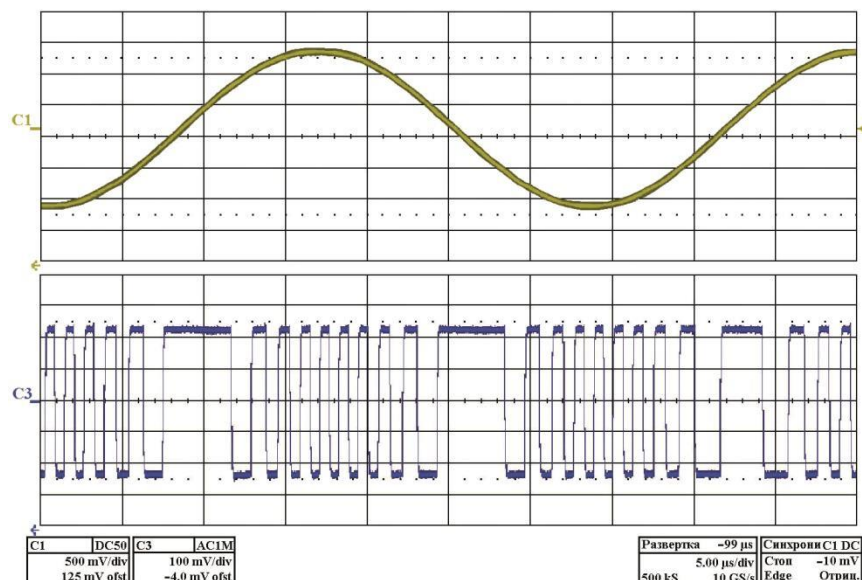


Рис. 2. Осциллограмма выходных ЧМ импульсов

Как показывает анализ возможных неисправностей, компаратор-формирователь ЧМ импульсов в процессе эксплуатации может либо разбалансироваться, либо потерять необходимое быстродействие, либо запереться и не пропускать часть импульсов. На рис. 3 на осциллограмме ЧМ импульсов кружком обозначено изменение сигнала, которое может регистрироваться частотомером либо как отдельный импульс, либо как единый, более длительный импульс. Такие случаи могут приводить к дополнительной частной составляющей погрешности установки К2-38, что не учитывается при поэлементной поверке.

Поверочные установки К2-56 и К2-85 имеют автоматический режим калибровки, когда внутренний частотомер контролирует установку заданного значения средней частоты ЧМ импульсов, а система автоматической регулировки подбирает амплитуду модулирующего сигнала. Экспериментально была обнаружена следующая неисправность — после подбора нужного значения амплитуды модулирующего сигнала уровень модулирующего сигнала не фиксировался, а возвращался к исходному (некалиброванному) значению. При поэлементной поверке такая неисправность также не может быть обнаружена, и неисправная поверочная установка может быть признана пригодной к эксплуатации.



Рис. 3. Осциллограмма ЧМ импульсов с изменением амплитуды импульса

Комплектная поверка с использованием эталона более высокого разряда позволяет сравнивать значение девиации частоты, воспроизводимое поверочной установкой, с эталонным значением, воспроизводимым первичным эталоном. В этом случае отпадает необходимость поэлементной поверки. Пригодность поверочной установки к эксплуатации сразу определяется с учётом всех искажений сигнала и возможных неисправностей компаратора-формирователя ЧМ импульсов.

После распада СССР Государственный специальный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 105-76, располагавшийся в г. Харькове, отошёл к Украине, и поэтому комплектная поверка рабочих эталонов 1-го разряда была затруднена. В результате совместных усилий ФГУП «ВНИИФТРИ» и Нижегородского ООО «НПП «Радио, приборы и связь» в 2004 г. были созданы Государственный первичный специальный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004 и поверочная схема для СИ девиации частоты ГОСТ Р 8.607-2004 [2]. Сразу после ввода в эксплуатацию в 2005 году на эталоне ГЭТ 166-2004 было поверено более 30 средств измерений. Это количество монотонно увеличивалось и в настоящее время составляет полторы сотни.

Поверочная схема ГОСТ Р 8.607-2004 несколько изменилась в связи с появлением новых более точных поверочных установок РЭЕДЧ-1, построенных по аналогичному принципу действия с Первичным эталоном единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004, а их погрешность воспроизведения девиации

частоты, в основном, обусловлена погрешностью воспроизведения девиации частоты первичного эталона. Поэтому поверочные установки РЭДЧ-1 применяются в качестве рабочих эталонов 0-го разряда, а установки К2-38, К2-56 и К2-85 применяются в качестве рабочих эталонов 1-го разряда. Также в качестве рабочих эталонов 1-го разряда применяются измерители модуляции СКЗ-39, СКЗ-40, СКЗ-41, СКЗ-43, СКЗ-45. Такая возможность появилась благодаря универсальности установок РЭДЧ-1, которые могут передавать размер единицы как калибраторам (поверочным установкам), так и измерителям девиации частоты.

Далее от рабочих эталонов 1-го разряда единица девиации частоты передаётся рабочим средствам измерений. Такая поверочная схема позволила повысить точность и достоверность измерений рабочих средств измерений. Кроме того, поверочной схемой ГОСТ Р 8.607-2004 предусмотрена возможность проверки наиболее точных средств измерений девиации частоты непосредственно на первичном эталоне единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004, что актуально при разработке новых средств измерений с погрешностью от 0,3 до 1,0 %.

Ещё несколько лет назад в качестве эталонов 0-го разряда могли применяться только поверочные установки РЭДЧ-1. Сейчас в качестве эталонов 0-го разряда применяются новые СИ: поверочные установки РЭДЧ-2, анализатор спектра N9040B. Эталоны 1-го разряда пополнились калибраторами модуляции К2-101, калибраторами SMBV-AM-FM, измерительными приёмниками FSMR, анализаторами спектра FSV, SPN9026A и др. Прослеживается тенденция в отказе от старых, разработанных в 70-х годах установок К2-38 К2-56 в пользу импортных прецизионных СИ, которыми уже оснастились некоторые региональные центры стандартизации и метрологии.

Можно отметить и другую современную тенденцию — расширение области применения первичного эталона. Сначала предполагалось использовать его для передачи размера единицы измерителям модуляции, девиограммам и генераторам, затем к ним добавились измерители фазового дрожания («джиттера»), позже появились анализаторы сигналов посадки и навигации, а в последнее время — анализаторы фазовых шумов. Кроме того, получены экспериментальные результаты, подтверждающие возможность передачи единицы девиации частоты анализаторам цифровой модуляции, а именно анализаторам модуляции QAM, QPSK, BPSK. Виды средств измерений, связанные с единицей девиации частоты, представлены на рис. 4.

Современные СИ имеют более широкие диапазоны частот и значений девиации частоты, точность некоторых СИ вплотную приблизилась к точности ГЭТ 166-2004 [2]. Поэтому в 2018 г. была начата работа по совершенствованию эталона единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004.



Рис. 4. Средства измерений, использующие единицу девиации частоты

Новый первичный эталон, получивший обозначение ГЭТ 166-2020, принципиально отличается от эталонов предыдущего поколения. Во-первых, существенно увеличилась точность — погрешность воспроизведения девиации частоты уменьшена в 2 раза. Во-вторых, в 10 раз расширен диапазон воспроизводимых значений девиации частоты — до 10 МГц. В-третьих, диапазоны несущих и модулирующих частот расширены соответственно в 26 и 5 раз. Для достижения таких результатов в усовершенствованном эталоне были применены новые цифровые технологии, реализующие цифровой анализ и цифровой синтез ЧМ сигналов. В дополнение к аппаратуре эталона ГЭТ 166-2004 в состав усовершенствованного первичного эталона введены: анализатор сигналов SPN9026A, запоминающий цифровой осциллограф HDO9404R-MS, генератор сигналов сложной/произвольной формы 81160A, калибратор частотной и фазовой модуляции K2-96 и ноутбук.

Таким образом, в усовершенствованном эталоне используются три калибратора девиации частоты: эталонный калибратор-компаратор из состава прежнего эталона, калибратор в виде генератора сигналов сложной/произвольной формы 81160A (для несущих частот f_0 в непрерывном диапазоне от 9 кГц до 250 МГц) и калибратор частотной и фазовой модуляции K2-96 для несущих частот 5, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000 и 4000 МГц.

Калибратор частотной и фазовой модуляции K2-96 и эталонный калибратор-компаратор основаны на методе электронно-счётного частотомера, однако их структурная схема имеет отличия. Калибратор K2-96 имеет встроенный генератор модулирующего сигнала, позволяющий работать на любой произвольной частоте рабочего диапазона от 20 Гц до 1 МГц, в то время как встроенный генератор модулирующего сигнала эталонного калибратора-компаратора

воспроизводит ряд фиксированных частот: 20, 30, 55, 400 Гц; 1, 6, 20, 30, 60, 100, 200 кГц. Кроме того, калибратор К2-96 имеет встроенный умножитель несущей частоты, позволяющий воспроизводить дополнительно несущие частоты 100, 250, 500, 1000, 2000 и 4000 МГц.

Калибратор в виде генератора сигналов сложной/произвольной формы 81160А основан на методе прямого цифрового синтеза. Его выходной сигнал задаётся в виде цифрового массива данных, который преобразуется быстродействующим цифро-аналоговым преобразователем в ЧМ сигнал с заданными значениями параметров f_0 , F_m и Δf . Важными характеристиками цифро-аналогового преобразователя являются его разрядность и тактовая частота (частота дискретизации сигнала). Генератор сигналов 81160А имеет 14-разрядный преобразователь с тактовой частотой 2,5 ГГц, и это позволяет воспроизводить ЧМ сигналы в широких диапазонах несущих и модулирующих частот с низким уровнем искажений и шумов.

В качестве компараторов к эталонному калибратору-компаратору из состава ГЭТ 166-2004 добавился широкополосный компаратор в виде анализатора сигналов SPN9026А. Анализатор имеет функцию аналоговой демодуляции и позволяет сравнивать девиацию сигнала любой несущей частоты (до 26 ГГц) с девиацией, воспроизводимой одним из калибраторов эталона на стандартной несущей частоте 50 МГц. В основе принципа действия анализатора сигналов SPN9026А, как у всех современных анализаторов, лежит супергетеродинный метод измерений с преобразованием сигнала на промежуточную частоту, преобразование аналого-цифровым преобразователем и дальнейшей цифровой обработкой массива полученных данных.

Внешний вид первичного эталона ГЭТ 166-2020 представлен на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид первичного эталона ГЭТ 166-2020

Метрологические характеристики усовершенствованного первичного эталона единицы девиации частоты

Диапазон значений девиации частоты Δf , воспроизводимых эталоном, диапазон частот модулирующих сигналов F_M и несущие частоты f_0 указаны в таблице 2.

Таблица 2

Диапазоны частот и значений девиации частоты

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 ($\Delta f \leq 0,2 \cdot f_0$)	0,02...1000,00 ($F_M \leq 0,05 \cdot f_0$)	0,09...250
1,0...10000	0,02...200,00	500; 1000; 2000; 4000

Размер единицы частоты (герц) передают от Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ-1. Государственный первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы девиации частоты со средним квадратическим отклонением результатов измерений S_0 , не превышающим $1 \cdot 10^{-4}$ при десяти независимых наблюдениях. Неисключённая систематическая погрешность Θ не должна быть более определяемой по формуле

$$\Theta = \Theta_M + \Theta_a, \quad (7)$$

где Θ_M — мультипликативная составляющая неисключённой систематической погрешности; Θ_a — аддитивная составляющая неисключённой систематической погрешности.

Значения Θ_M и Θ_a в зависимости от характеристик воспроизводимых частотно-модулированных сигналов указаны в таблице 3.

Таблица 3

Значения составляющих НСП

f_0 , МГц	F_M , кГц	$\Theta_M = (0,3...0,5) \times 10^{-3} \Delta f$, Гц	$\Theta_a = (10...3000)$, Гц	$\Theta = \Theta_M + \Theta_a = (310...3500)$, Гц ($\Delta f = 1000$ кГц)
0,09...50	0,02...20,0	$0,3 \times 10^{-3} \Delta f$	1...10	310
	20...200	$0,5 \times 10^{-3} \Delta f$	50	550
	200...1000	$0,5 \times 10^{-3} \Delta f$	250	750
50...250	20...200	$0,5 \times 10^{-3} \Delta f$	50...250	550...750
500			600	1100
1000			1000	1500
2000			1800	2300
4000			3000	3500

В ходе исследований метрологических характеристик нового первичного эталона удалось установить, что мультипликативная составляющая неисключённой систематической погрешности Θ_M в широком диапазоне модулирующих и несущих частот не выходит за пределы $\pm 0,5 \cdot 10^{-3} \Delta f$. Что касается аддитивной составляющей неисключённой систематической погрешности Θ_a , то она примерно пропорциональна несущей частоте и зависит от ширины полосы компаратора. Отсюда с очевидностью проистекает вывод о том, что передачу единицы девиации частоты следует осуществлять на несущей частоте в нижней части его рабочего диапазона (или поддиапазона). На практике стандартная несущая частота 50 МГц подходит практически для любого измерителя модуляции или анализатора сигналов (спектра). В редких случаях, например для измерителя модуляции СКЗ-49/1, требуется несущая частота 1,0 ГГц, так как измеритель имеет второй независимый вход для диапазона от 1 до 18 ГГц.

С другой стороны, при нормировке погрешности средства измерений девиации частоты следует учитывать зависимость аддитивной составляющей погрешности от несущей частоты. Здесь следует отметить определённый разницей в нормировке погрешности, особенно для генераторов сигналов. ГОСТ 9788-78 предусматривает нормировку погрешности установки девиации частоты в процентах «без учёта паразитной частотной модуляции» на модулирующей частоте 1 кГц. Поэтому погрешность отечественных генераторов, как правило, не имеет аддитивной составляющей. Так, например, у генератора сигналов Г4-219 нормируется только мультипликативная составляющая погрешности, которая может оказаться в сотни и тысячи раз меньше реальной погрешности прибора в его рабочем диапазоне. У зарубежных генераторов сигналов обычно погрешность установки девиации частоты имеет мультипликативную и аддитивную составляющие. И лишь у некоторых новых средств измерений (например, К2-101, СКЗ-50) погрешность нормирована обеими составляющими с указанием линейной зависимости аддитивной составляющей от несущей частоты.

В рамках работ по совершенствованию первичного эталона ГЭТ 166-2004 проводились сопоставления технических характеристик аналоговых и цифровых калибраторов девиации частоты. Первые результаты свидетельствовали о значительном вкладе шумовой составляющей цифровых калибраторов в неисключённую систематическую погрешность. Поэтому первоначально не предполагалось использовать калибратор на основе генератора сигналов сложной/произвольной формы 81160А для воспроизведения малых значений девиации частоты [3]. Однако в дальнейшем удалось подобрать такие режимы работы генератора, что его шумовая составляющая оказалась сопоставима,

а при некоторых условиях измерений ниже, чем у аналогового калибратора К2-96. В таблице 4 приведены результаты определения шумовой составляющей, выраженной как среднеквадратическим, так и пиковым значениями девиации частоты.

Таблица 4

Результаты измерений на несущей частоте 50 МГц

Тип калибратора	Пик/скз	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
		Измеренный уровень частотных шумов, Гц						
81160А	Пик	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	Пик	11,5	7,1	36,7	118	260	716	1430
	СКЗ	0,95	1,6	7,0	24,1	52,1	138	260

Данные таблицы свидетельствуют, что при правильном выборе режима работы генератора сигналов сложной/произвольной формы 81160А он не уступает аналоговым калибраторам по составляющей Θ_a . Кроме того, как было показано в [3], калибратор девиации частоты в виде генератора сигналов сложной/произвольной формы 81160А имеет значение коэффициента гармоник ЧМ сигнала, не превышающее 0,03 %. Следует отметить, что и это малое значение коэффициента гармоник не влияет на воспроизводимое пиковое значение девиации частоты, так как оно задаётся методом прямого цифрового синтеза от установленного цифрового значения, указанного на экране генератора.

В последнее время для передачи единицы девиации частоты применяют не только цифровой синтез сигнала, но даже в большей степени цифровой анализ ЧМ сигналов. Большинство современных анализаторов сигналов/спектра, измерительных приёмников, имеющих функцию «Analog Demod Application», построены по принципу преобразования в сигнал промежуточной частоты с дальнейшим преобразованием его в цифровой массив быстродействующим аналого-цифровым преобразователем. Дальнейшая обработка сигнала производится по цифровым данным, применяется цифровая фильтрация, многократное усреднение и другие способы снижения шумовой составляющей сигнала. Современные анализаторы спектра/сигнала с функцией аналогового демодулятора позволяют не только отфильтровать сигнал известной модулирующей частоты, но и определить другие параметры сигнала, прежде всего, его коэффициент гармоник, а также до десятка других параметров. Среди анализаторов спектра/сигнала наиболее точно измеряют девиацию частоты анализаторы FSW8, FSW13, FSW26, N9040B, SPN9026A, которые можно рекомендовать как рабочие эталоны.

Внедрение усовершенствованного эталона позволит за счёт расширения диапазонов частот увеличить парк рабочих эталонов. Предполагается, что именно в расширенном диапазоне значений девиации частоты от 1 до 10 МГц будет востребована передача единицы девиации частоты. Это позволит контролировать погрешность таких СИ, как анализаторы спектра FSW8, FSW13, FSW26, генераторов сигналов RFSG12, расширить диапазоны значений девиации частоты таких СИ, как анализаторы спектра N9040B, N9041B, анализаторы сигналов SPN9026A, калибраторы K2-101, и вновь разрабатываемых СИ.

В ближайшие 10 лет первичный эталон единицы девиации частоты обеспечит передачу единицы всем имеющимся и вновь разрабатываемым средствам измерений девиации частоты. В ближайшей перспективе следует ожидать создания рабочих эталонов единицы девиации частоты с расширенным диапазоном значений до 10 МГц, расширенным диапазоном модулирующих частот и повышенной точностью измерения.

Заключение

Научно-технический прогресс приводит к существенным изменениям и развитию метрологического обеспечения, которое особенно заметно в области измерений девиации частоты. Расширились диапазоны измерений, диапазоны частот, повысилась точность современных средств измерений. Наблюдается определённая связь со смежными областями измерений, в частности с измерением фазовых шумов и измерением параметров цифровой модуляции. Легко заметить, что снижение фазовых шумов в современных высокочастотных генераторах влечёт за собой снижение аддитивной составляющей погрешности измерения девиации частоты, что, в свою очередь, может снизить погрешность определения уровня фазовых шумов, а также погрешность измерения параметров векторной модуляции.

Список литературы

1. Болмусов Ю.Д., Павленко Ю.Ф., Соколовский Н.П. Метрологическое обеспечение измерителей модуляции. — М.: Воениздат, 1992.
2. Государственный специальный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004 / Под ред. В.В. Окрепилова // Российская метрологическая энциклопедия: в 2-х т. — СПб.: Лики России, 2015. — С. 566.
3. Могилев И.В., Мыльников А.В. Первичный эталон единицы девиации частоты. Новые возможности и перспективы // Измерительная техника. — 2019. — № 1. — С. 3–7.

Статья поступила в редакцию: 22.03.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 26.03.2021 г.

Статья принята в работу: 01.04.2021 г.