

Первичный эталон единицы девиации частоты. Новые возможности и перспективы

И. В. Могилев, А. В. Мыльников

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: lab203@vniiftri.org

Рассмотрена возможность расширения рабочих диапазонов частот и увеличения точности Государственного первичного специального эталона единицы девиации частоты ГЭТ 166–2004. Предложены и описаны методы и средства измерений девиации частоты, которые могут быть включены в состав усовершенствованного ГЭТ 166–2004. Представлены результаты исследований четырёх независимых методов измерения девиации частоты: метод электронно-счётного частотомера; метод прямого цифрового синтеза; метод нулей функции Бесселя; метод измерения экстремальных значений периода.

Ключевые слова: частотная модуляция, компаратор, калибратор, единица девиации частоты, генератор сигналов, анализатор спектра, цифровой осциллограф, воспроизведение, первичный эталон.

За последние десять лет наметился значительный прогресс в области средств измерений (СИ) параметров частотно-модулированных (ЧМ) сигналов. В России взамен устаревших измерительных образцовых установок К2-38 и вычислительных измерителей модуляции СКЗ-45 разработаны и выпускаются новые эталонные поверочные установки К2-85, РЭДЧ-1, РЭДЧ-2 и измерители модуляции СКЗ-49, СКЗ-49/1, СКЗ-50, СКЗ-50/1 [1]. Наблюдается прогресс в освоении цифровой техники. Такие компании, как Rohde&Schwarz, Keysight Technologies, Fluke Corporation выпускают десятки типов генераторов сигналов, работающих по принципу прямого цифрового синтеза (direct digital synthesis (DDS)) и формирующих выходной сигнал с помощью цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Такие генераторы сигналов, как правило, работают в широком диапазоне несущих частот и воспроизводят девиацию частоты с высокой точностью. Измерительные устройства с аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) также постоянно совершенствуются. Прежде всего, это цифровые осциллографы и анализаторы спектра с функциями измерения девиации частоты и нелинейных искажений.

Параметры действующего Государственного первичного специального эталона единицы девиации частоты ГЭТ 166–2004 для несущих частот 5 и 50 МГц находятся на уровне лучших мировых аналогов. Однако появилось большое количество достаточно точных СИ с расширенным диапазоном измеряемых (воспроизводимых) значений девиации частоты (~10 МГц), расширенным диапазоном модулирующих частот. Некоторые СИ требуют расширения диапазона несущих частот, что влечёт необходимость совершенствования ГЭТ 166–2004.

В основу принципа установления единицы девиации частоты в ГЭТ 166–2004 положены три независимых метода измерения: метод электронно-счётного частотомера; метод нулей функции Бесселя; метод измерения экстремальных значений периода [2]. Каждый из методов имеет особенности,

различные диапазоны значений девиации частоты и составляющие погрешности измерения. С помощью современных цифровых СИ можно дополнить действующую структуру четырёх независимым методом измерения – методом прямого цифрового синтеза, а также на несколько порядков повысить разрешающую способность метода измерения экстремальных значений периода.

Целью исследований – совершенствование ГЭТ 166–2004 с применением новых цифровых методов на основе быстродействующих ЦАП и АЦП. Включение в состав ГЭТ 166–2004 приборов нового поколения с соответствующими характеристиками позволит реализовать перечисленные независимые методы измерения девиации и расширить возможности эталона.

Метод электронно-счётного частотомера. В состав ГЭТ 166–2004 входит эталонный калибратор-компаратор, который выполняет функцию воспроизведения, хранения и передачи единицы девиации частоты. Работа эталонного калибратора-компаратора основана на методе электронно-счётного частотомера.

Калибратор представляет собой источник измерительных ЧМ-сигналов с фиксированными несущими частотами 5; 50 МГц и обеспечивает воспроизведение калиброванных значений девиации частоты в пределах 10^{-10} Гц в диапазоне фиксированных модулирующих частот 0,02–200 кГц.

Неисключённая систематическая погрешность (НСП) воспроизведения девиации частоты калибратором составляет 0,05–0,15 % в диапазоне модулирующих частот 20–200 · 10³ Гц.

Основными источниками погрешности являются коэффициент гармоник ЧМ-сигнала, погрешность делителя, сопутствующая амплитудная модуляция и нестабильность промежуточной частоты.

Метод прямого цифрового синтеза. Уникальность этого метода, ранее не использованного в работе ГЭТ 166–2004, заключается в следующем. Во-первых, это независимый ме-

Т а б л и ц а 1

Погрешность воспроизведения девиации частоты, %

F_M , кГц	Метод измерений	Девиация частоты Δf , кГц				
		10000	1000	500	100	10
0,03	ГЭТ 166–2004	–	– 0,024	0,055	– 0,014	0,096
	Метод нулей функции Бесселя	–	–	–	–	–
	Метод экстремальных значений частоты	–	0,013	–	–	–
0,09	ГЭТ 166–2004	–	– 0,023	0,060	– 0,015	– 0,090
	Метод нулей функции Бесселя	–	–	–	–	–
	Метод экстремальных значений частоты	–	0,008	–	–	–
0,4	ГЭТ 166–2004	–	– 0,015	0,079	– 0,023	– 0,111
	Метод нулей функции Бесселя	–	–	–	–	–
	Метод экстремальных значений частоты	–	– 0,014	–	–	–
1,0	ГЭТ 166–2004	–	– 0,022	0,033	0,020	0,110
	Метод нулей функции Бесселя	–	–	–	–	–
	Метод экстремальных значений частоты	–	– 0,010	–	–	–
6,0	ГЭТ 166–2004	–	– 0,023	0,049	0,013	– 0,059
	Метод нулей функции Бесселя	–	–	–	0,012	– 0,022
	Метод экстремальных значений частоты	–	– 0,015	–	–	–
20	ГЭТ 166–2004	–	– 0,029	0,057	– 0,037	0,050
	Метод нулей функции Бесселя	–	–	0,023	0,006	–
	Метод экстремальных значений частоты	–	– 0,018	–	–	–
30	ГЭТ 166–2004	–	– 0,041	– 0,032	– 0,106	– 0,178
	Метод нулей функции Бесселя	–	–	0,022	0,021	–
	Метод экстремальных значений частоты	0,007	– 0,017	–	–	–
60	ГЭТ 166–2004	–	– 0,041	– 0,108	– 0,205	– 0,060
	Метод нулей функции Бесселя	–	–	0,021	0,021	–
	Метод экстремальных значений частоты	0,002	–	–	–	–
100	ГЭТ 166–2004	–	– 0,026	– 0,077	– 0,206	– 0,130
	Метод нулей функции Бесселя	–	0,0010	0,0004	–	–
	Метод экстремальных значений частоты	– 0,006	0,024	–	–	–
200	ГЭТ 166–2004	–	0,008	– 0,154	– 0,073	0,097
	Метод нулей функции Бесселя	–	0,020	0,021	–	–
	Метод экстремальных значений частоты	– 0,004	–	–	–	–

тод воспроизведения, опирающийся только на частоту дискретизации (внутренний опорный генератор) и не требующий калибровки девиации частоты. Во-вторых, в DDS-генераторах может отсутствовать погрешность делителя напряжения и погрешность, обусловленная нелинейностью характеристики модулятора. В-третьих, метод DDS в отличие от метода на основе аналогового модулятора предоставляет возможность

воспроизведения больших значений девиаций частоты, вплоть до значения несущей частоты.

К недостаткам метода прямого цифрового синтеза можно отнести наличие шума из-за дискретности формирования сигнала (как дискретность разряда ЦАП, так и конечная длина формируемого цифрового файла).

В течение последних 12 лет с помощью ГЭТ 166–2004 исследовали метрологические характеристики высокочастотных генераторов на основе прямого цифрового синтеза. Из нескольких десятков высокочастотных генераторов особое внимание заслужили генераторы сигналов SMB100A, SMBV100A фирмы Rohde&Schwarz и генератор сигналов сложной/произвольной формы 81160A фирмы Keysight Technologies. Была рассмотрена возможность применения данных генераторов в качестве эталонных средств формирования девиации частоты.

Передача единицы девиации частоты осуществляется на нескольких стандартных несущих частотах; наиболее часто используют несущую частоту 50 МГц. Генератор сигналов SMB100A использует прямой цифровой синтез только до 23,4 МГц, так как содержит ЦАП с частотой дискретизации 200 МГц. Этот генератор воспроизводит ЧМ-сигнал и на более высоких несущих частотах, однако при этом его метрологические характеристики заметно ухудшаются.

Генераторы сигналов SMBV100A имеют режим векторной модуляции, что, как показали проведенные испытания [3], позволяет использовать их как рабочие эталоны 1-го разряда при передаче единицы девиации частоты (несущая частота 50 МГц). Заметным ограничением является шум из-за дискретности формиро-

вания сигнала: при полосе пропускания демодулированного сигнала 200 кГц пиковое значение шума составляет около 600 Гц.

Генератор сигналов сложной/произвольной формы 81160A имеет 14-разрядный ЦАП с частотой дискретизации 2,5 ГГц и может воспроизводить сигналы с несущей частотой до 500 МГц. Характеристики именно этого генератора исследовали наиболее подробно. В частности, тремя независимыми методами

изучена погрешность воспроизведения девиации частоты, определены коэффициент гармоник, шумовая составляющая ЧМ-сигнала и её зависимость от несущей и модулирующей частот, а также зависимость от уровня сигнала.

Результаты измерения девиации частоты Δf , воспроизводимой генератором, представлены в табл. 1, где F_m – частота модуляции.

Отличия воспроизводимых генератором и измеренных с помощью ГЭТ 166–2004 значений девиации частоты, как правило, не превышают НСП эталона. Отличия значений, полученных методом нулей функции Бесселя и методом экстремальных значений частоты ещё в несколько раз меньше.

Специалисты отмечают низкий уровень гармоник ЧМ сигнала, сформированного методом прямого цифрового синтеза [4]. Исследования коэффициента гармоник (THD) генератора сигналов сложной/произвольной формы 81160A с помощью анализатора сигналов FSW8-K7 фирмы Rohde&Schwarz показали, что гармоники совсем незначительны, а результат измерений во многом обусловлен собственным коэффициентом гармоник анализатора сигналов, который гарантирует коэффициент гармоник менее 0,1 % (THD менее –60 дБ) при девиации частоты не более 500 кГц. Результаты измерений коэффициента гармоник приведены в табл. 2.

Согласно табл. 2 на всех частотах модуляции наблюдается некоторое увеличение коэффициента гармоник при малых значениях девиации частоты (10 кГц), что можно объяснить увеличением относительного значения шумовой составляющей анализируемого сигнала. В любом случае измеренное значение коэффициента гармоник не превысило 0,03 %.

С уменьшением воспроизводимого значения девиации частоты дискретность ЦАП генератора увеличивает влияние на погрешность воспроизведения. Это регистрируется СИ девиации частоты как повышенный уровень шума. Особенно увеличены шумы при максимальной полосе пропускания демодулированного сигнала (200 кГц). Экспериментально было установлено, что уровень этого частотного шума уменьшается с увеличением амплитуды (мощности) выходного сигнала генератора. На компараторе ГЭТ 166–2004 производилось сравнение частотного шума генератора сигналов сложной/произвольной формы 81160A и калибратора эталона. Для защиты компаратора от перегрузки и выравнивания амплитуд сигналов к выходу генератора подключался внешний аттенюатор 16–20 дБ. При максимальном выходном уровне сигнала генератора частотные шумы практически не отличались от шумов калибратора эталона (пиковое значение около 100 Гц при полосе пропускания 200 кГц), однако при полосе 3 кГц уровень шума генератора существенно превышает шум калибратора. Проведённые в рамках данной работы дополнительные исследования показали, что в спектре демодулированного ЧМ-сигнала есть паразитная девиация 20 Гц на частоте модуляции 1 кГц. Поэтому полностью заменить эталонный калибратор рассматриваемым генератором нельзя. При воспроизведении малых значений девиации частоты целесообразно применять эталонный калибратор.

Анализ полученных результатов свидетельствует, что генератор сигналов сложной/произвольной формы

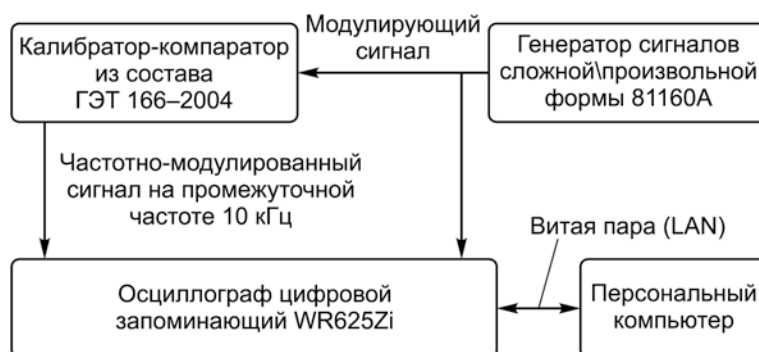
Таблица 2
Результаты измерений коэффициента гармоник, дБ

F_m , кГц	Девиация частоты Δf , кГц				
	10000	1000	500	100	10
1,0	–89,1	–89,3	–89,5	–89,7	–78,5
20	–81,8	–82,4	–85,3	–86,2	–69,2
60	–79,5	–85,5	–91,9	–91,9	–72,3
100	–75,2	–81,4	–105	–106	–69,0
200	–69,3	–72,8	–66,9	–79,1	–69,0

81160A перспективен для применения в качестве эталонного средства воспроизведения девиации. Метод прямого цифрового синтеза следует применять как один из нескольких независимых методов для установления единицы девиации частоты и расширения диапазонов несущих и модулирующих частот.

Метод нулей функции Бесселя. Метод нулей функции Бесселя [5], который реализуется с помощью анализатора спектра, позволяет определить парциальное значение девиации частоты (только 1-й гармоники). Следует отметить, что применимость метода нулей функции Бесселя для аналоговых генераторов ограничена из-за нестабильности несущей частоты. За время настройки на точное значение модулирующей частоты изменяется значение несущей частоты, что мешает оператору отследить момент минимальной амплитуды несущей частоты. Поэтому измерить данным методом значения девиации менее 1 кГц весьма проблематично. Стабильные DDS-генераторы позволяют существенно расширить диапазон применимости метода.

Кроме того, некоторые современные анализаторы спектра (E4440A, FSV, FSW, SPN9026 и т. д.) имеют опцию измерителя модуляции, поэтому они могут быть применены в качестве компаратора для расширения диапазона несущих частот. При достаточно высокой точности компарирования они могут дополнить имеющийся в составе эталонный компаратор и таким образом расширить диапазон несущих частот при измерении девиации частоты.



Блок-схема измерения девиации частоты методом экстремальных значений

Состав усовершенствованного ГЭТ 166–2004

Наименование составной части	Выполняемая функция	Требуемые характеристики
Калибратор девиации частоты	Воспроизведение и хранение единицы девиации частоты	Несущая частота $f_0=5$; 50 МГц Модулирующие частоты 0,02–200 кГц Диапазон значений девиации частоты $\Delta f=10\ldots 1\cdot 10^6$ Гц
Компаратор девиации частоты	Передача единицы девиации частоты	Несущая частота $f_0=5$; 50 МГц Фиксированные модулирующие частоты в диапазоне 0,02–200 кГц Диапазон значений девиации частоты $\Delta f=10\ldots 1\cdot 10^6$ Гц
Генератор сигналов сложной/произвольной формы 81160А	Воспроизведение и хранение единицы девиации частоты	Диапазон значений девиации частоты $\Delta f=10\ldots 1\cdot 10^6$ Гц (возможно расширение до 10 МГц)
Осциллограф цифровой запоминающий WR 625Zi	Установление единицы девиации частоты методом экстремальных значений Исследование НСП	Длительность периодов 20 нс – 2 мкс Разрешающая способность 1 пс
Анализатор сигналов SPN 9026А	Установление единицы девиации частоты методом нулей функции Бесселя Расширение диапазона несущих частот до 1000 МГц (в перспективе до 26000 МГц) Контроль гармоник в ЧМ-сигнале	Диапазон несущих частот $f_0=10$ Гц...26000 МГц Функция измерителя модуляции с диапазоном измерения девиации частоты $\Delta f=10\ldots 1\cdot 10^6$ Гц
Частотомер электронно-счётный вычислительный ЧЗ-64	Установление единицы девиации частоты методом электронно-счётного частотомера Калибровка установок К2-38 при поверке	Диапазон частот 5– $1\cdot 10^6$ Гц
ПЭВМ	Управление аппаратурой Обработка и хранение результатов	3,0 ГГц, 80 ГБ Интерфейсы RS-232, USB

Еще одной важной функцией современных анализаторов спектра является измерение коэффициента гармоник демодулированного ЧМ-сигнала. Наличие гармонических составляющих в спектре ЧМ-сигнала является источником погрешности воспроизведения единицы девиации частоты и вносит расхождения при измерениях различными методами.

Метод экстремальных значений. Метод измерения экстремальных значений периода ЧМ-сигнала известен уже давно. Тем не менее, он обычно уступал по точности определения девиации частоты методам нулей функции Бесселя или электронно-счётного частотомера. Однако в связи с появлением новых цифровых осциллографов с мощными высокоскоростными АЦП (частота дискретизации более 10 ГГц) стало актуальным проведение работ по исследованию метода экстремальных значений.

Экспериментальные данные. С помощью цифрового запоминающего осциллографа WR 625Zi фирмы LeCroy можно добиться снижения погрешности измерения девиации

в диапазоне модулирующих частот $20\text{--}30\cdot 10^3$ Гц на промежуточной частоте порядка 10 кГц. Схема включения осциллографа WR 625Zi приведена на рисунке.

Относительная погрешность измерения девиации частоты $\delta(\Delta f)$ на модулирующих частотах 0,02; 0,09; 0,4; 1; 6; 20; 30 кГц составила соответственно 0,013; 0,008; –0,014; –0,010; 0,015; 0,018; 0,017 %.

Из результатов измерений следует, что разница между значением, воспроизводимым калибратором эталона и измеренным значением не превышает $\pm 0,02$ % при НСП воспроизведения девиации частоты эталоном 0,05–0,1 %. На частотах модуляции свыше 30 кГц методическая погрешность измерения девиации частоты становится доминирующей. Эту проблему можно решить с помощью высокоскоростных АЦП современных осциллографов. Для этого необходимо произвести измерения на несущей частоте и увеличить девиацию частоты до 10 МГц.

Исследования метода экстремальных значений проводились на несущей частоте 50 МГц в диапазоне модулирующих частот 20–200 кГц. Разница между значением, воспроизво-

димым генератором сигналов сложной/произвольной формы 81160A и измеренным значением девиации частоты $\delta(\Delta f)$ на частотах модуляции 20; 30; 60; 100; 200 кГц составила соответственно 0,009; 0,007; 0,002; –0,006; –0,002 %.

В результате была получена сходимость результатов цифровых методов воспроизведения и измерения девиации частоты, не превышающая 0,007 % что, в 20 раз меньше НСП ГЭТ 166–2004. При измерении девиации частоты введены поправки на шумовую и методическую погрешности, рассчитанные по оригинальной методике [6].

Результаты исследования показали, что применение метода экстремальных значений позволит расширить до 10 МГц диапазон измеряемых (воспроизводимых) значений девиации частоты, а также позволит снизить НСП ГЭТ 166–2004.

Предложения по усовершенствованию состава ГЭТ 166–2004. Состав и основные функции частей усовершенствованного ГЭТ 166–2004 представлены в табл. 3.

Заключение. Включение в состав ГЭТ 166–2004 приборов нового поколения и применение четырёх независимых методов измерения девиации частоты позволит улучшить его характеристики и расширить возможности: уменьшить в 2–3 раза систематическую погрешность; повысить достоверность оценки погрешности измерения в результате контроля коэффициента гармоник, снижения уровня шумов и введения расчётных поправок; создать непрерывный диапазон несущих частот до 250 МГц с помощью генератора сигналов прямого цифрового синтеза; создать непрерывный диапазон модулирующих частот 10 Гц – 200 кГц, в перспективе до 500 кГц; расширить диапазон девиации частоты до 10 МГц.

Литература

1. 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. М.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. С. 298–301.
2. Государственный специальный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166–2004 // В кн.: Российская Метрологическая Энциклопедия. В двух томах. Т.1. / Под ред. В. В. Окрепилова. СПб.: ИИФ «Лики России», 2015. С. 566.
3. Мыльников А. В., Пивак А. В. Калибратор амплитудно- и частотно-модулированных сигналов на базе векторного генератора // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 37–40.
4. 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.
5. Павленко Ю. Ф., Шпаньон П. А. Измерение параметров частотно-модулированных колебаний. М.: Радио и связь, 1986.
6. Могилев И. В., Мыльников А. В. Расчет поправки на методическую и шумовую погрешности измерения девиации частоты для метода экстремальных значений // Метрология в радиоэлектронике: Тез. докл. X науч.-техн. конф., Москва, 20–22 июня 2016 г. М.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. С. 362–365.

Дата принятия: 26.10.2018.

The primary standard of frequency deviation. New opportunities and perspectives

I. V. Mogilev, A. V. Mylnikov

All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements, Mendeleev, Moscow region, Russia, e-mail: lab203@vniiftri.org

The article discusses the possibility of extending the range of operating frequencies and improvement the accuracy of the State primary special standard of the frequency deviation unit GET 166–2004. The article provides a description of the methods and means of measurement of frequency deviation, which are supposed to be included in the GET 166–2004. The results of the study of four independent methods for measuring frequency deviation are presented. Recommendations on the expansion of the primary standard are given.

Key words: frequency modulation, comparator, calibrator, error, frequency deviation, signal generator, spectrum analyzer, digital oscilloscope, reproduction, measurement, method, standard.