

Метрологическое обеспечение измерений коэффициента гармоник низкочастотных радиотехнических сигналов

А.В. ПРУГЛО, В.Е. МУЗАЛЕВСКИЙ, Ю.И. КАЗАНЦЕВ
e-mail: info@zel-zet.ru

Рассмотрено современное состояние метрологического обеспечения измерителей коэффициента гармоник, основанных на цифровых методах измерения и синтеза сигналов. Приведены основные метрологические характеристики калибратора-измерителя СК6-20, генератора-калибратора СК6-122, измерителя-калибратора СК6-20А, измерителя СК6-220.

Ключевые слова: коэффициент гармоник, нелинейные искажения, измерители и калибраторы коэффициента гармоник, синтез сигналов.

Важными параметрами низкочастотных (килогерцовой области) радиотехнических сигналов являются спектральный состав сигнала и коэффициент гармоник K_r (в зарубежной литературе используется термин total harmonic distortions THD, в отечественной технической литературе применяют также термины «коэффициент нелинейных искажений», «коэффициент искажения синусоидальности»).

В настоящее время используют два способа измерений K_r : 1) классический – измерение вольтметром среднеквадратических значений (СКЗ) раздельно напряжения первой гармоники U_1 и суммы напряжений высших гармоник U_i , а затем вычисление K_r по формуле

$$K_r = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{i=2}^{N_g} U_i^2}; \quad (1)$$

и 2) спектральный – измерение амплитудных значений напряжения необходимого числа N_g спектральных гармонических составляющих и вычисление K_r по той же формуле.

Заметим, что в первых отечественных приборах для оценки формы низкочастотных радиотехнических сигналов – измерителях нелинейных искажений (например, СК-6, СК-7) – был реализован метод измерений коэффициента нелинейных искажений $K_{НИ}$ в соответствии с формулой

$$K_{НИ} = \sqrt{\sum_{i=2}^{N_g} U_i^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^{N_g} U_i^2}. \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что коэффициенты K_r и $K_{НИ}$ связаны между собой соотношением $K_{НИ} = K_r / \sqrt{1 + K_r^2}$ и при незначительных искажениях сигналов (малых значениях K_r и $K_{НИ}$) практически совпадают.

Чтобы получить K_r первым, классическим способом (именно так работает большинство измерителей K_r), необходимо удалить из исследуемого сигнала первую гармонику и измерить СКЗ напряжения оставшегося сигнала; выделить первую гармонику из полного сигнала и измерить ее СКЗ; вычислить K_r . При подавлении или выделении первой гармоники практически не должно оставаться следов гармоник, иначе они увеличат погрешность измерений. Решение этой задачи представляет значительные трудности и требует сложных схемотехни-

ческих решений. Например, в измерителе-калибраторе СК6-13 с этой целью применяются высокодобротные активные режекторные фильтры: первая ступень – двойной Т-образный мост, две последующие ступени – мост Вина–Робинсона (достигается подавление до 100 дБ); в поверочной установке типа РЭКГ использованы две ступени двойного Т-образного моста (достигается подавление до 100 дБ на фиксированных частотах). При этом принято во внимание, что высокодобротные режекторные фильтры практически не влияют на амплитуду и фазу высших гармоник. В указанных схемах требуется много активных элементов, что усложняет конструкцию приборов и увеличивает их суммарную погрешность. Еще один недостаток рассмотренного способа состоит в том, что при наличии в исследуемом сигнале интергармоник (см. ниже) и негармонических компонентов они будут измерены вольтметром СКЗ и исказят реальные результаты измерений. Этой погрешности удастся избежать при реализации спектрального способа измерений K_r .

Спектральные способы измерений K_r могут быть аналоговыми или цифровыми в зависимости от метода получения спектральных компонентов сигнала. В силу ограниченности динамического диапазона из-за наличия активных элементов во входных цепях измерительных приборов здесь также необходимо применять режекторные фильтры, но только при измерении малых значений K_r . Кроме того, нет необходимости в глубоком подавлении первой гармоники и, следовательно, в высокой добротности фильтров, поскольку можно учесть влияние фильтра на каждую спектральную составляющую. Достаточно, например, использовать подавление первой гармоники 40 дБ и пассивный фильтр с добротностью 0,25.

В настоящее время в стране эксплуатируется большой парк измерителей и калибраторов коэффициента гармоник (нелинейных искажений): С6-11, С6-12, СК6-10, СК6-13, С6-14, С6-15, К2С-57. В основном, эти приборы разработаны в 80-х годах прошлого столетия и построены на аналоговых фильтрах и умножителях частоты. Их типичные характеристики: диапазон измерения и воспроизведения K_r от 0,003 – 0,01 до 100 %; абсолютная погрешность измерения и воспроизведения K_r от сотых долей процента при малых K_r до десятков процентов при $K_r = 100$ %; частотный диапазон от 10 – 20 Гц до 100 – 200 кГц; фиксированный набор частот первой и высших гармоник (у калибраторов); отсутствуют возможности наблюдения спектрального состава сигнала и измерения начальных фазовых сдвигов.

Наряду с морально устаревшими СИ, перечисленными выше, разработаны новые приборы также аналогового типа: измеритель коэффициента гармоник СК6-18, калибратор коэффициентов гармоник СК6-21, поверочные установки СК6-19, К2С-84, РЭКГ. Отметим, что они воспроизводят K_r при фиксированных значениях амплитуды и частоты.

Однако большую привлекательность имеют цифровые методы формирования прецизионных гармонических сигналов и сигналов с требуемыми формой и спектральным составом, а также измерений K_r . Принцип действия приборов для решения этих задач основан на прямом цифровом синтезе гармонических сигналов и аналого-цифровом преобразовании (АЦП) входных сигналов с использованием дискретного преобразования Фурье и последующим определением параметров спектральных составляющих (модуля и фазы) первой и высших гармоник входного сигнала. Для этого используют современные цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) и АЦП, например, производства фирмы Analog Devices. Применение АЦП соответствующих разрядов и последующая цифровая обработка результатов измерений статистическим методом обеспечивает определение параметров входного сигнала при уровне шумов и помех от внешних источников, сравнимых и даже превышающих полезный сигнал.

Суть используемого цифрового метода определения K_r и синтеза сигналов с требуемыми спектральным составом и значением K_r заключается в следующем. По исходным данным (информации о частоте первой гармоники и выборке отсчетов исследуемого сигнала) необ-

ходимо оценить параметры модели

$$s(t) = \sum_{i=0}^N A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (3)$$

где A_i , f_i , φ_i – амплитуда, частота и фаза i -й гармоники.

Требуется найти амплитуды и фазы первой и высших гармоник. Шум, который содержится в исследуемом сигнале, считается аддитивным и нормальным с известной корреляционной функцией. Данная задача решается при помощи статистического подхода, описанного в [2]. Оценки амплитуды и фазы в дискретном виде выражаются формулами

$$A_i = \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi f_i}{f_D} k\right) \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin\left(\frac{2\pi f_i}{f_D} k\right) \right)^2 \right]^{1/2};$$

$$\varphi_i = \arctg \left[\frac{\sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin\left(\frac{2\pi f_i}{f_D} k\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi f_i}{f_D} k\right)} \right],$$

где N – число отсчетов в выборке; $x(k)$ – k -й элемент выборки; f_D – частота дискретизации сигнала; при этом амплитуды A_i используются для вычисления значения K_r по (1).

В нашей стране описанный метод был впервые использован при создании эталонов единицы коэффициента нелинейных искажений с ограниченным диапазоном и точностью измерений для воспроизведения размера единицы. Накопленный опыт позволил создать и внедрить в метрологическую практику линейку цифровых эталонных и прецизионных рабочих средств измерений (СИ) коэффициента гармоник, а также разработать взамен эталона ХГНИИМ (Украина), который имел статус межгосударственного, государственный первичный эталон единицы коэффициента гармоник ГЭТ 188–2010. Первичный эталон создан, хранится и применяется в ФГУП «ВНИИФТРИ», эталонные и прецизионные рабочие СИ созданы в ЗАО «НПЦентр» и ООО «ЗЭТ» при широком научно-техническом сотрудничестве указанных трёх предприятий.

В приборах разработки ЗАО «НПЦентр» и ООО «ЗЭТ» реализованы цифровые методы синтеза сигналов с требуемыми коэффициентами гармоник и измерения параметров сигналов. В них использован 16-разрядный АЦП AD9260 фирмы Analog Devices.

Основные характеристики первого разработанного прибора – калибратора-измерителя нелинейных искажений СК6-20: диапазон измерения $K_r = 0,001 - 100 \%$ в диапазоне частот первой гармоники $0,01 - 200$ кГц; пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения $0,005 - 4 \%$ в зависимости от частоты и измеряемого K_r . Погрешность нормируется, если частота высшей гармоники в исследуемом сигнале не превышает 1 МГц, при этом K_r вычисляется с учетом только десяти высших гармоник. У прибора имеются возможности наблюдения и хранения в памяти ПЭВМ формы и спектра исследуемого сигнала, а также измерения амплитуд и начальных фазовых сдвигов до десяти высших гармоник относительно первой, при этом по команде оператора это могут быть любые гармоники со 2-й по 11-ю или, например, с 20-й по 29-ю (при условии, что частота высшей гармоники не превышает 1 МГц). Измеритель позволяет определять и индексировать суммарный уровень интергармоник, заполняющих спектр сигнала между первой и высшими гармониками, относительно первой гар-

моники в динамическом диапазоне от минус 110 до 0 дБ. Под интергармониками понимаются составляющие сигнала с частотой, не кратной частоте первой гармоники, которые превышают уровень шумов, определяемый при измерениях как утроенное СКО от СКЗ напряжения по всей выборке измерений при заданной частоте дискретизации за вычетом амплитудных значений напряжений первой и высших гармоник. Количество этих гармоник (не более десяти) задается оператором. Измеритель СК6-20 позволяет также получать амплитудно- и фазово-частотные характеристики четырехполюсников.

Все измеряемые параметры и режимы работы, а также результаты измерений отображаются на экране монитора ПЭВМ. В качестве примера на рис. 1 показано рабочее окно в режиме измерений сигнала, который создан генератором сигналов произвольной формы 33220А фирмы Agilent. Заданы частота первой гармоники 2000 Гц, уровень второй гармоники 0,1 %. Количество измерений в серии установлено 5 (может быть от 1 до 20). Индицируются частота и амплитуда первой гармоники, коэффициент гармоник, количество измерений в серии, средние значения и оценки СКО погрешности результата измерений K_r , амплитуды и частоты первой гармоники.

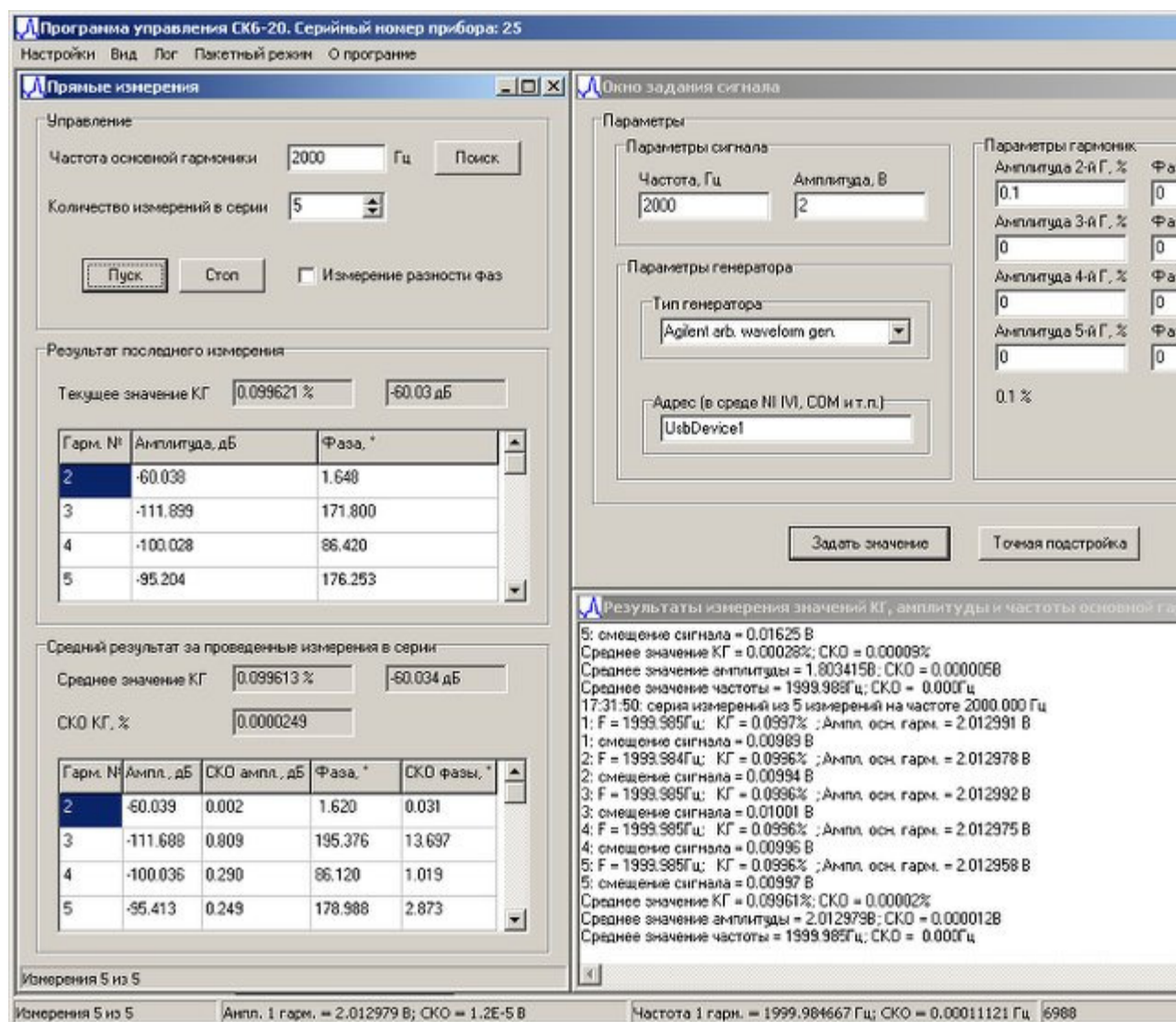


Рис.1 Рабочее окно калибратора-измерителя СК6-20 в режиме измерений сигнала

Следует отметить следующее. В 2009 г., когда проводились испытания в целях утверждения типа СК6-20, у разработчиков отсутствовали статистически достоверные экспериментальные

данные о погрешностях измерений K_r созданным прибором, а ГЭТ 188–2010 еще находился в стадии разработки и исследований. Поэтому при утверждении типа СК6-20 и документации на прибор обе составляющие погрешности измерений (аддитивная и мультипликативная) для обеспечения технологического запаса были завышены, причем, как показала практика, в ряде случаев существенно.

В дальнейшем были проанализированы протоколы первичных и периодических поверок СК6-20 на ГЭТ 188–2010 в 2010 – 2012 гг.; всего было обработано 43 протокола поверки 39 экземпляров СК6-20, причем три прибора проходили поверку дважды, один – трижды. Учитывались результаты всех поверок. В таблице приведены наименьшее и наибольшее превышения погрешностей измерений K_r , указанных в технической документации (ТД) СК6-20, над реально полученными при поверках, в наиболее характерных точках. Кроме того, для этих же точек приведено превышение погрешности, указанной в ТД, над средним арифметическим по всему массиву протоколов поверок.

Частота первой гармоники, кГц	Отношение m погрешности измерений, установленной в ТД, к погрешности, определенной при поверках СК6-20, для K_r , %								
	0.01			1			100		
	m_{\min}	m_{\max}	$m_{\text{ср}}$	m_{\min}	m_{\max}	$m_{\text{ср}}$	m_{\min}	m_{\max}	$m_{\text{ср}}$
0.010	3	42	19	7	360	930	5	3700	230
0.2; 1.0; 20	2	5200	33	2	2500	74	2.5	3300	276
200	2.5	320	165	2.5	570	1575	4	280	230

Из таблицы следует, что измеритель СК6-20 имеет существенный запас по точности как при измерении малых K_r , когда преобладает аддитивная составляющая, так и больших K_r , когда наибольший вклад в погрешность вносит мультипликативная составляющая. К настоящему времени (декабрь 2017 г.) выпущено более 170 единиц СК6-20, опыт их первичных и периодических поверок подтверждает высокие точностные характеристики приборов.

Следующим этапом развития измерителей коэффициента гармоник стал прибор СК6-220. По принципу действия и основным характеристикам он аналогичен калибратору-измерителю СК6-20. Основные различия: измеритель СК6-220 управляется встроенным процессором и не нуждается во внешнем компьютере; динамический диапазон расширен до 50 В; прибор измеряет уровни интергармоник и субгармоник сигнала; по измеренным значениям коэффициента гармоник прибор вычисляет и индицирует коэффициент нелинейных искажений.

Измеритель СК6-220, как и СК6-20, предназначен для использования в качестве рабочего эталона 2-го разряда по государственному стандарту [1]. Он может также применяться в качестве рабочего СИ следующих величин: коэффициента гармоник и коэффициента нелинейных искажений; амплитуды и частоты первой гармоники; уровня, частоты и начальных фаз высших гармоник относительно первой, уровня и частоты интергармоник и субгармоник низкочастотных сигналов. На измеритель СК6-220 зарегистрирована декларация ТС № RU Д-RU.МЛЮ6.В.00111 от 11.05.2016 г. о соответствии СК6-220 требованиям Технических регламентов Таможенного союза ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» и 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств».

Кроме калибратора-измерителя СК6-20 и измерителя СК6-220, метод цифрового синтеза на основе выражения (3) реализован в генераторе-калибраторе гармонических сигналов СК6-122. Основными узлами генератора являются тактовый кварцевый генератор VX7 на частоту

107 МГц, специализированный процессор на основе FPGA микросхемы XC3S400 для генерирования цифровых данных, связанный по интерфейсу USB с ПЭВМ, 16-разрядный ЦАП типа AD9726 и четырехкаскадный усилитель на основе операционных усилителей AD8021. Основные метрологические характеристики генератора-калибратора СК6-122:

воспроизведение гармонических сигналов в диапазоне частот 0,1 Гц – 1 МГц с шагом 0,024 Гц;

воспроизведение K_r в диапазоне 0,001 – 100 % с дискретностью 0,001 %, причем способ формирования сигнала с заданным значением K_r , уровни высших гармоник и их начальные фазы задает оператор;

диапазон воспроизведения амплитуды первой гармоники (максимального значения сигнала произвольной формы) 0,01 – 10 В на нагрузке 600 Ом, дискретность 10 мВ; поскольку при некоторых амплитудах и фазовых сдвигах высших гармоник максимальное значение сигнала может превышать амплитуду первой гармоники, в генераторе предусмотрена ее автоматическая подстройка до значения, при котором максимум сигнала не будет превышать заданного;

абсолютная погрешность воспроизведения K_r (при амплитуде напряжения первой гармоники 1 В) 0,0008–2 % в зависимости от частоты и значения K_r ; как и для измерителей, в случае малых K_r преобладает аддитивная составляющая погрешности, а при больших – мультипликативная составляющая.

Все измеряемые параметры и режимы работы, а также результаты измерений отображаются на экране монитора ПЭВМ.

В качестве иллюстраций на рис. 2, 3 приведены скриншоты сигналов, воспроизведенных генератором-калибратором СК6-122, по результатам их измерения и представления в частотной области при помощи измерителя СК6-20. На рис. 2 показан чистый гармонический сигнал частотой 2 кГц, видны отдельные интергармонические составляющие на уровне –100 дБ и шумы ниже уровня –110 дБ; на рис. 3 – сигнал частотой первой гармоники 10 кГц, в который добавлены вторая и пятая гармоники с амплитудами соответственно 0,2 и 0,1 % амплитуды первой гармоники, видны отдельные интергармонические составляющие на уровне минус 105 дБ и шумы ниже уровня минус 110 дБ.

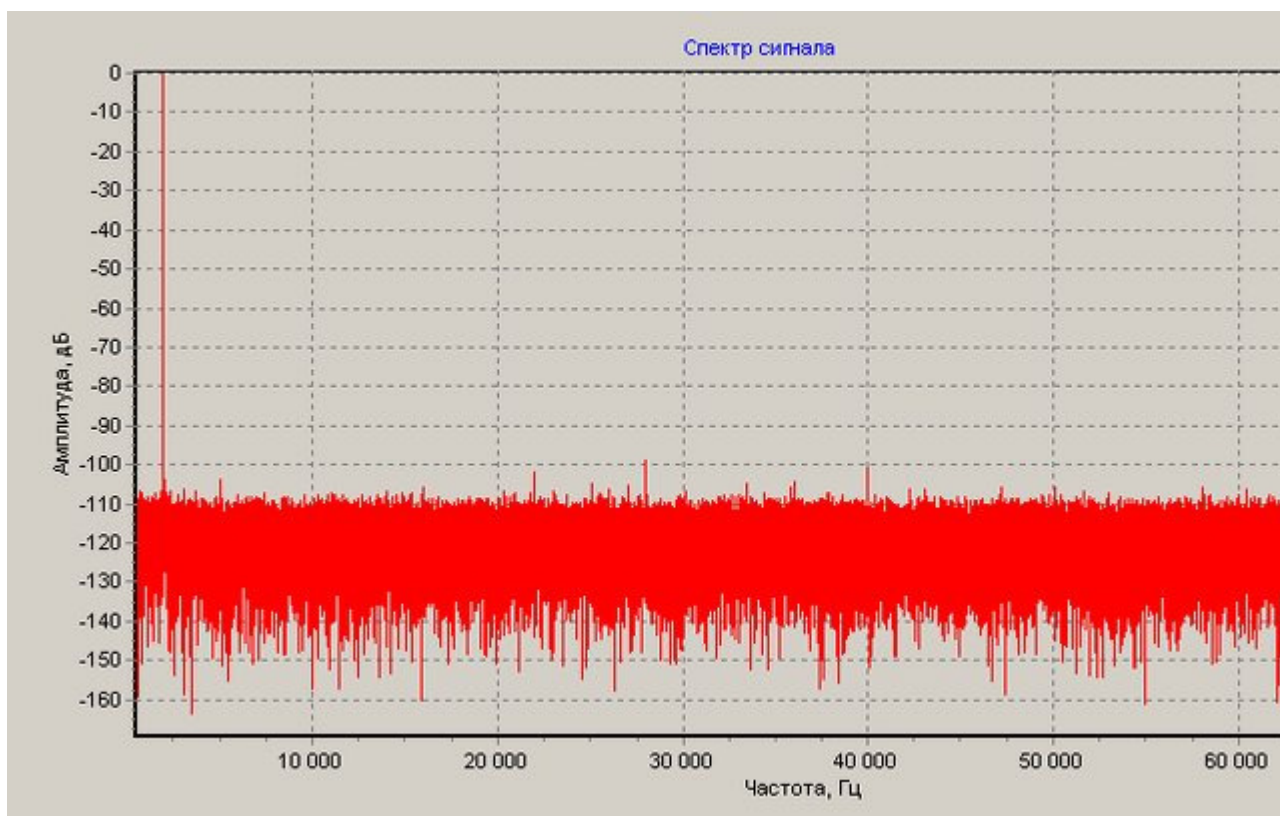


Рис.2 Чистый гармонический сигнал частотой 2 кГц, воспроизведенный генератором-калибратором СК6-122 и измеренный калибратором-измерителем СК6-20

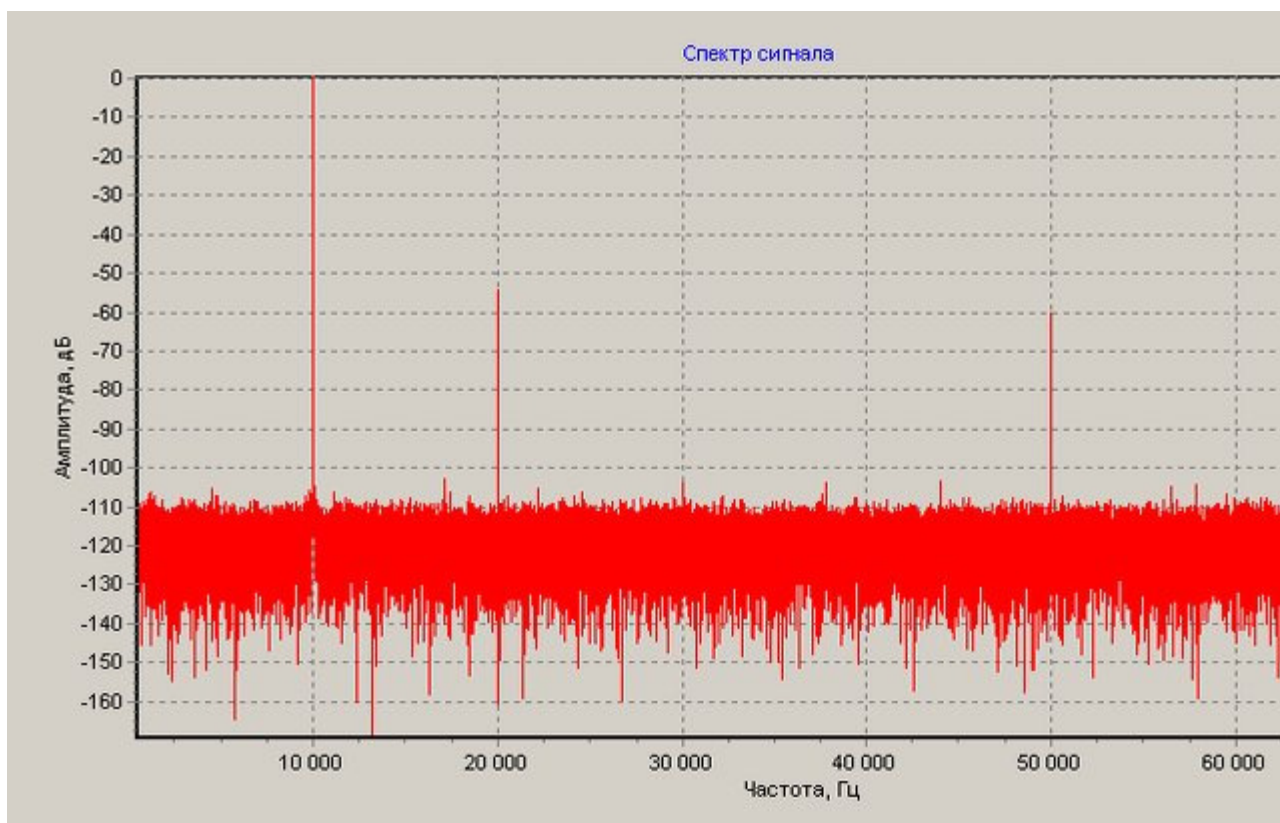


Рис.3 Сигнал частотой первой гармоники 10 кГц, содержащий вторую и пятую гармоники. Воспроизведение – СК6-122, измерение – СК6-20

На рис. 4 во временной области показаны примеры реализации сигнала, воспроизведенного генератором-калибратором СК6-122, с частотой первой гармоники 1 кГц, $K_r = 30\%$ и следующим спектральным составом в процентах амплитуды первой гармоники (такое распределение высших гармоник присуще, например, установке для поверки измерителей нелинейных искажений СК6-10): 26,25; 13,5; 3,78731; 3,78731 % соответственно для второй – пятой гармоник.

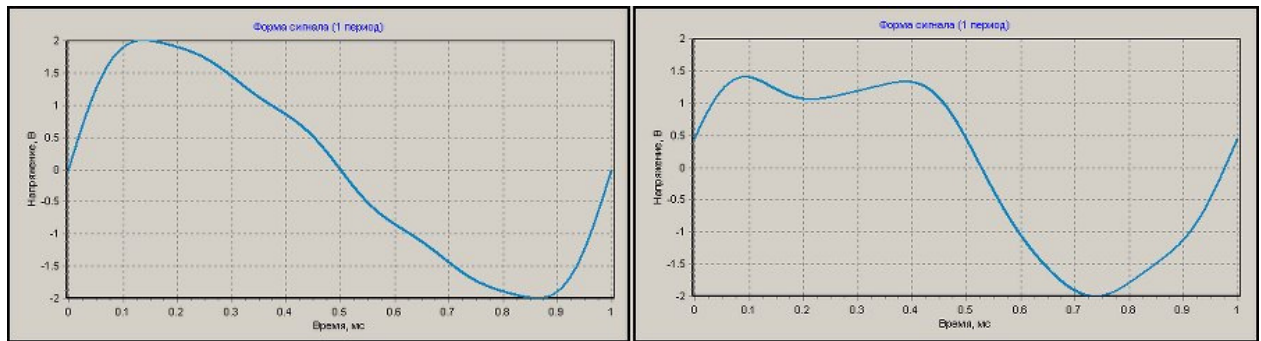


Рис.4 Формы сигналов генератора-калибратора СК6-122 с частотой первой гармоники 1 кГц, $K_r = 30\%$ и добавлением второй – пятой гармоник; а) – начальные фазы высших гармоник равны нулю; б) – начальная фаза второй гармоники равна 90°

На рис. 4а) все высшие гармоники имеют начальный нулевой фазовый сдвиг относительно первой; на рис. 4б) начальная фаза второй гармоники отличается на 90° от начальной фазы первой. Видно, как на форму сигнала при одном и том же спектральном составе и коэффициенте гармоник влияют начальные фазы высших гармоник относительно первой. Максимальное значение напряжения сигнала ограничено 2 В (задается оператором до 10 В и поддерживается автоматически).

Анализ протоколов первичных поверок СК6-122 показал, что во всех динамическом и частотном диапазонах обеспечен не менее, чем двукратный запас точности воспроизведения заданных значений K_r . С начала в 2011 г. выпуска по настоящее время (декабрь 2017 г.) выпущено более 60 единиц СК6-122, опыт их первичных и периодических поверок подтверждает высокие точностные характеристики приборов. По метрологическим характеристикам калибратор-измеритель СК6-122 отвечает требованиям, предъявляемым в [1] к рабочим эталонам 1-го разряда и прецизионным генераторам сигналов низкой частоты.

Генератор-калибратор гармонических сигналов СК6-122, а также усовершенствованный измерительный блок СК6-20А, созданный на базе калибратора-измерителя СК6-20, образуют измеритель-калибратор коэффициента гармоник СК6-20А, который предназначен для использования в качестве вторичного эталона единицы коэффициента гармоник (исполнение СК6-20А-01) или рабочего эталона 1-го разряда согласно [1]. В частности, измеритель-калибратор СК6-20А-01, изготовленный в 2013 г. ООО «ЗЭТ» для нужд собственной метрологической службы, аттестован и утвержден приказом Росстандарта в качестве вторичного эталона единицы коэффициента гармоник. Его первичная и ежегодные периодические поверки в 2013 – 2017 гг. на ГЭТ 188–2010 подтверждают не только высокую точность измерения и воспроизведения единицы, но и временную стабильность метрологических характеристик.

Перечисленные выше СИ разработки ООО «ЗЭТ» прошли испытания в целях утверждения типа в ФГУП «ВНИИФТРИ» с использованием аппаратуры ГЭТ 188–2010 и зарегистрирова-

ны в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений. Все первичные поверки этих СИ, которые выпускает ООО «ЗЭТ», проводятся на вторичном эталоне предприятия. Периодические поверки осуществляют метрологическая служба ООО «ЗЭТ», ВНИИФТРИ и региональные ЦСМ, для чего они снабжены калибраторами-измерителями СК6-20, генераторами-калибраторами СК6-122, измерителями-калибраторами СК6-20А-01 и СК6-20А, измерителями СК6-220. Таким образом, можно констатировать, что все звенья государственной поверочной схемы [1] взаимно согласованы и обеспечены современными СИ, в которых реализованы последние достижения цифровых технологий и электронной элементной базы.

Литература

1. ГОСТ Р 8.762–2011. Национальный стандарт Российской Федерации. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента гармоник.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1975.