

## Метрологическое обеспечение измерений коэффициента гармоник низкочастотных радиотехнических сигналов

Ю. И. КАЗАНЦЕВ, В. Е. МУЗАЛЕВСКИЙ, А. В. ПРУГЛО

ЗАО «НПЦентр», Москва, Россия, e-mail: info@npcentre.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.*

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

*The current state of metrological assurance of THD meters based on digital measurements methods and the synthesis of signals is considered. The key metrological characteristics of the calibrator-meter СК6-20, generator-calibrator СК6-122 and meter-calibrator СК6-20А are presented.*

**Key words:** total harmonic distortion factor (THD), nonlinear distortions, THD meters and calibrators, synthesis of signals.

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

До недавнего времени метрологическое обеспечение измерений коэффициента гармоник (нелинейных искажений) сигналов осуществлялось на основе межгосударственных стандартов [1, 2]. Поверочную схему по [1] возглавляет государственный первичный эталон ДЕТУ 09-01—96, который создан в 1992 г. в Институте метрологии (Харьков), хранится и применяется там же. Эталон, как и стандарты [1, 2], не только морально устарел, но и находится в другом государстве, что создает дополнительные трудности организационного характера.

В 2011 г. Росстандартом утвержден созданный в 2008—2010 гг. во ВНИИФТРИ государственный первичный эталон ГЭТ 188—2010 единицы коэффициента гармоник в диапазоне 001—100 % для сигналов с основной гармоникой в диапазоне частот 10—200000 Гц. С 01.01.2013 г. на территории РФ введена государственная поверочная схема [3], которая адекватно отражает сложившиеся в России реалии в рассматриваемом виде измерений.

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

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

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 в соответствии с формулой

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

Нетрудно видеть, что коэффициенты  $K_r$  и  $K_{\text{НИ}}$  связаны между собой соотношением  $K_{\text{НИ}} = K_r / \sqrt{1 + K_r^2}$  и при незначительных искажениях сигналов (малых значениях  $K_r$  и  $K_{\text{НИ}}$ ) 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 схемотехнических 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 искажат реальные результаты измерений. Этой погрешности удастся избежать при реализации спектрального способа измерений  $K_r$ .

Спектральные способы измерений  $K_f$  могут быть аналоговыми или цифровыми в зависимости от метода получения спектральных компонентов сигнала. В силу ограниченности динамического диапазона из-за активных элементов во входных цепях измерительных приборов здесь также необходимо применять режекторные фильтры, но только при измерении малых значений  $K_f$ . 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, приборы разработаны в 80-х годах прошлого столетия и построены на аналоговых фильтрах и умножителях частоты. Их типичные характеристики: диапазон измерения и воспроизведения  $K_f$  от 0,003—0,01 до 100 %; абсолютная погрешность измерения и воспроизведения  $K_f$  от сотых долей процента при малых  $K_f$  до десятков процентов при  $K_f = 100$  %; 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.

Государственный первичный эталон ДЕТУ 09-01—96 воспроизводит единицу  $K_f$  в диапазоне 0,003—100 % при достаточно больших значениях неисключенной систематической погрешности (НСП) и средних квадратических отклонений (СКО) результата измерений. Как указано выше, в настоящее время вместо него в России действует ГЭТ 188—2010. 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  $K_f$  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  $K_f$ . 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  $K_f$  и синтеза сигналов с требуемыми спектральным составом и значением  $K_f$  заключается в следующем. По исходным данным (информации о частоте первой гармоники и выборке отсчетов исследуемого сигнала) необходимо оценить параметры модели

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

где  $A_i$ ,  $f_i$ ,  $\varphi_i$  — 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 [4]. Оценки амплитуды и фазы в дискретном виде выражаются формулами

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

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

где  $N$  — число отсчетов в выборке;  $x(k)$  —  $k$ -й элемент выборки;  $f_d$  — частота дискретизации сигнала; при этом амплитуды  $\hat{A}_i$  используются для вычисления значения  $K_f$  по (1).

В нашей стране описанный метод был впервые использован при создании эталонов единицы коэффициента нелинейных искажений с ограниченным диапазоном и точностью измерений при воспроизведении размера единицы. Накопленный опыт позволил, с одной стороны, создать и внедрить в метрологическую практику линейку цифровых эталонных и прецизионных рабочих средств измерений  $K_f$ , с другой стороны — разработать на современной элементной базе государственный первичный эталон России с целью замены ДЕТУ 9-01—96. Эти задачи решались соответственно в НПЦентре и ВНИИФТРИ в значительной степени независимо, однако с использованием опыта совместных разработок и при широком научно-техническом сотрудничестве.

Основными узлами эталона являются эталонные калибратор и измеритель  $K_f$ . В приборах реализованы цифровые методы синтеза сигналов с требуемыми  $K_f$  и измерения параметров сигналов. Метрологические характеристики эталона, указанные в [3]:  $K_f = 0,001...100$  % в диапазоне частот первой гармоники 0,01—200 кГц; СКО результата измерений при десяти независимых наблюдениях  $S = 5 \cdot 10^{-6}...3 \cdot 10^{-3}$  % в зависимости от значений  $K_f$ ; НСП  $\Theta = 1 \cdot 10^{-4}...4 \cdot 10^{-2}$  % в зависимости от частоты первой гармоники сигнала и измеряемого  $K_f$ .

Аналогичный метод обработки исследуемого сигнала реализован в НПЦентре при создании калибратора-измерителя нелинейных искажений СК6-20, в котором использован 16-разрядный АЦП AD9260 фирмы Analog Devices. Основные метрологические характеристики прибора: диапазон измерения  $K_f = 0,001...100$  % в диапазоне частот первой гармоники 0,01—200 кГц; абсолютная суммарная погрешность измерения 0,005—4 % в зависимости от частоты и измеряемого  $K_f$ . Погрешность нормируется, если частота высшей гармоники в исследуемом сигнале не превышает 1 МГц, при этом  $K_f$  вычисляется с учетом только десяти высших гармоник.

Отметим особенности прибора, присущие только СК6-20 и важные, например, при исследованиях измерителей параметров качества электроэнергии. Имеются возможности наблюдения и хранения в ПЭВМ формы и спектра исследуемого сигнала, а также измерения амплитуд и начальных фазовых сдвигов до десяти высших гармоник относительно

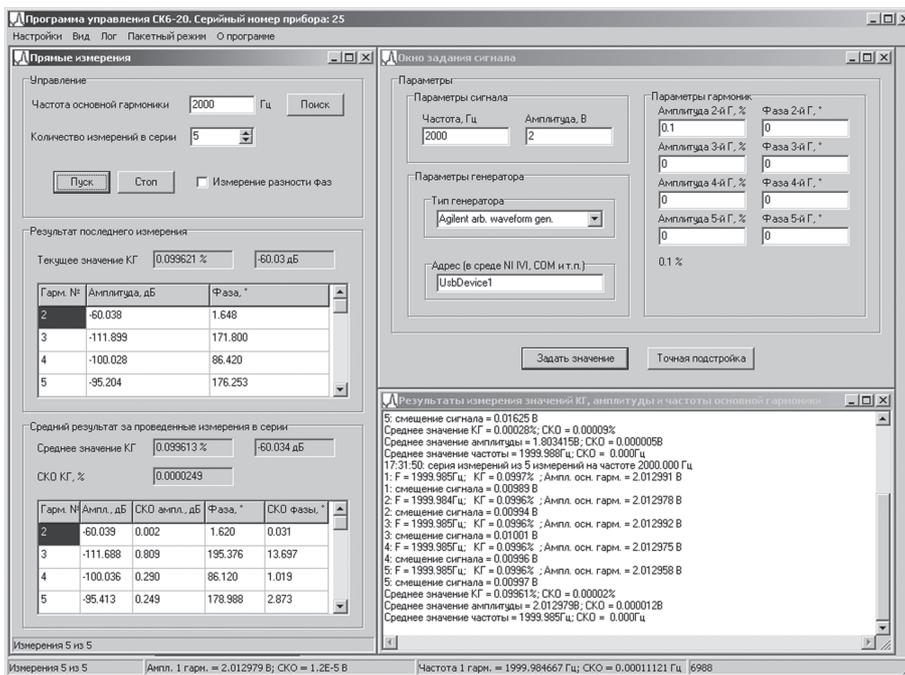


Рис. 1. Рабочее окно калибратора-измерителя СК6-20 в режиме измерений сигнала

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 индцировать суммарный уровень интергармоник, заполняющих спектр сигнала между первой и высшими гармониками, относительно первой гармоники в динамическом диапазоне от -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 фазочастотные характеристики четырехполосников.

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 погреш-

Частота первой гармоники, кГц	Отношение $m$ погрешности измерений, установленной в ТД, к погрешности, определенной при поверках СК6-20, для $K_r$ , %								
	0,01			1			0,01		
	$m_{min}$	$m_{max}$	$m_{cp}$	$m_{min}$	$m_{max}$	$m_{cp}$	$m_{min}$	$m_{max}$	$m_{cp}$
0,010	3	42	19	7	3600	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

ности результата измерений  $K_r$ , амплитуды и частоты первой гармоники.

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 2010—2012 гг. были проанализированы протоколы первичных и периодических поверок СК6-20 на ГЭТ 188—2010; всего обработано 43 протокола поверки 39 экземпляров СК6-20, причем три прибора прошли 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 полученными при поверках в наиболее характерных точках. Кроме того, для этих же точек приведено превышение погрешности над средним арифметическим по всему массиву протоколов поверок.

Из таблицы следует, что измеритель СК6-20 имеет существенный запас по точности; фактически приписываемые ему погрешности могут быть снижены как при измерении малых  $K_r$ , когда преобладает аддитивная составляющая, так и больших  $K_r$ , когда наибольший вклад в погрешность вносит мультипликативная составляющая.

По своим метрологическим характеристикам измеритель СК6-20 отвечает требованиям, которые государственный стандарт [3] предъявляет к рабочим эталонам 2-го разряда и прецизионным рабочим измерителям  $K_r$ .

Кроме калибратора-измерителя СК6-20, 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 измеряемого  $K_r$ ; при этом, как и для измерителя СК6-20, 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 -105 дБ и шумы ниже уровня -110 дБ.

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.

На рис. 4, а все высшие гармоники имеют начальный нулевой фазовый сдвиг относительно первой; на рис. 4, б начальная фаза второй гармоники отличается на  $90^\circ$  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, которых в 2012 г. было изготовлено одиннадцать экземпляров, показал, что, как и в случае СК6-20, во всех динамическом и частотном диапазонах обеспечен не менее, чем двукратный запас точности воспроизведения заданных значений  $K_r$ .

По метрологическим характеристикам калибратор-измеритель СК6-122 отвечает требованиям, предъявляемым в [3] 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 измерителя СК6-20, образуют изме-

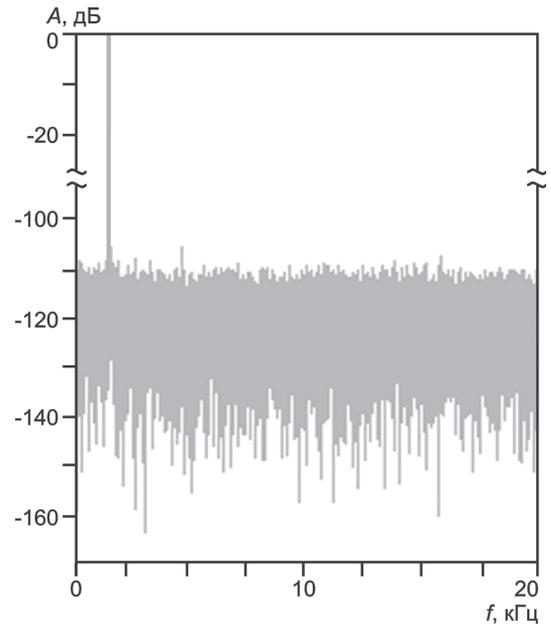


Рис. 2. Чистый гармонический сигнал частотой 2 кГц, воспроизведенный генератором-калибратором СК6-122 и измеренный калибратором-измерителем СК6-20

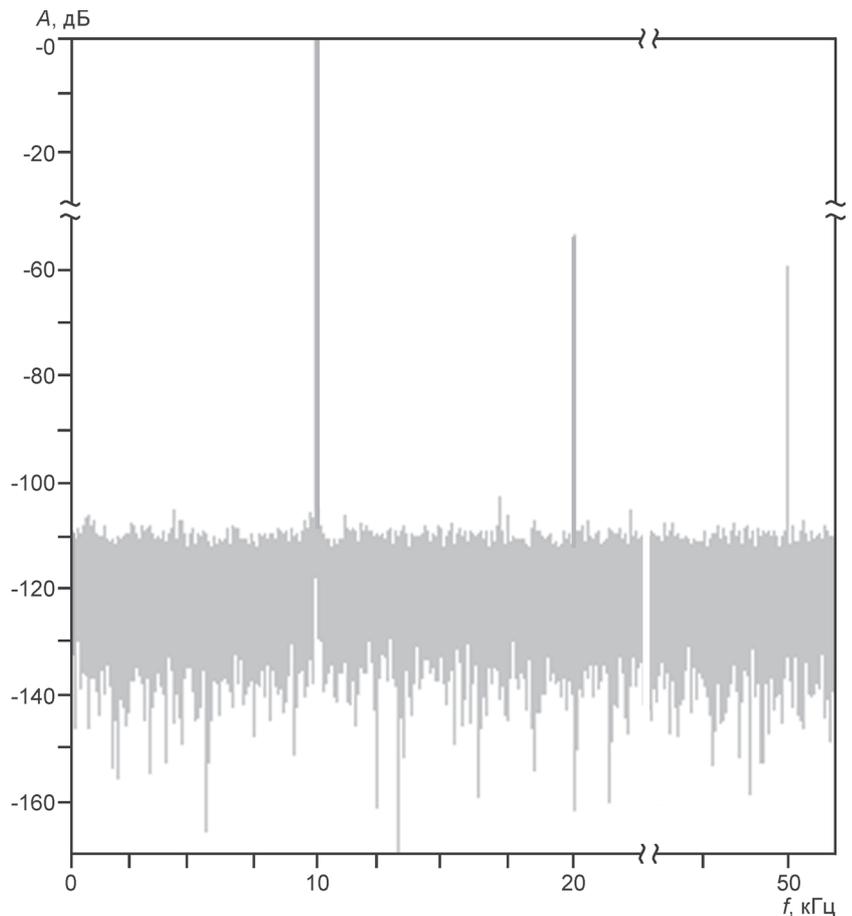


Рис. 3. Сигнал частотой первой гармоники 10 кГц, содержащий вторую и пятую гармоники; воспроизведение — СК6-122, измерение — СК6-20

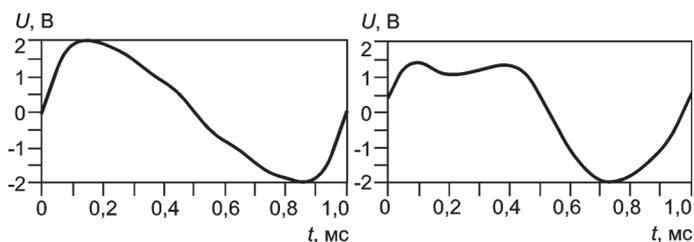


Рис. 4. Формы сигналов частоты генератора-калибратора СК6-122 с первой гармоникой 1 кГц,  $K_r = 30\%$  и добавлением второй — пятой гармоник:

а — начальные фазы высших гармоник равны нулю; б — начальная фаза второй гармоники равна  $90^\circ$

ригель-калибратор коэффициента гармоник СК6-20А, который по своим метрологическим характеристикам предназначен для использования в качестве вторичного эталона единицы  $K_r$  или рабочего эталона 1-го разряда согласно [3].

Примером практического использования метода прямого цифрового синтеза гармонических сигналов служит также серия прецизионных генераторов гармонических сигналов, описанная в [5]. К сожалению, поскольку к дате написания указанной статьи во ВНИИФТРИ уже был разработан и утвержден ГЭТ 188—2010, обоснование методики и специально созданного оборудования для проверки достигнутых значений  $K_r$ , а также полученные по этому параметру результаты выглядят не очень убедительно.

Перечисленные выше средства измерений (СИ) разработки НПЦентр прошли испытания в целях утверждения типа

с использованием аппаратуры ГЭТ 188—2010 и зарегистрированы в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений. Первичные и периодические поверки этих СИ проводятся на том же эталоне. Таким образом, можно констатировать, что все звенья государственной поверочной схемы [3] взаимно согласованы и обеспечены современными СИ, в которых реализованы последние достижения цифровых технологий и электронной элементной базы.

#### Литература

1. ГОСТ 8.110—97. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента гармоник.
2. ГОСТ 8.331—99. ГСИ. Измерители коэффициента гармоник. Методы и средства поверки и калибровки.
3. ГОСТ Р 8.762—2011. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента гармоник.
4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1975.
5. Андриянов А.В. и др. Новые средства формирования низкочастотного гармонического сигнала с малым коэффициентом гармоник и проблемы их метрологического обеспечения // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 49—52; A. V. Andriyanov et al. New means of generating a low-frequency sine-wave signal with a low harmonic distortion coefficient and the problems of providing metrological backup // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 7. P. 813—818.

Дата принятия 13.06.2013 г.

621.391.8

## Панорамный приемник с автоматической подстройкой преселектора

И. П. СИВОКОНЬ, С. А. СИНЕЛЬНИКОВ

Конструкторское бюро «Селена», Краснодар, Россия, e-mail: metr@kbselena.ru

Описана работа панорамного измерительного приемника в диапазоне частот 1500—2400 МГц с автоматической подстройкой входного полосового фильтра по склону его резонансной характеристики.

**Ключевые слова:** панорамный измерительный приемник, преселектор, автоматическая подстройка.

The operation of panoramic measuring receiver in the frequency range 1500—2400 MHz with automatic trim control of input bandwidth filter along the slope of its resonance characteristics is described.

**Key words:** panoramic measuring receiver, preselector, automatic trim control.

В измерительной технике давно известны панорамные измерительные приемники (ПИП) и анализаторы спектра со встроенными входными резонансными полосовыми фильтрами-преселекторами, перестраиваемыми по частоте сопряженно с перестройкой первого гетеродина. Узкополосные входные перестраиваемые полосовые фильтры (ППФ) позволяют расширить динамический диапазон измерений, ограничиваемый уровнем помех, которые проникают

на выход измерительного прибора через комбинационные каналы приема, формирующиеся в первом смесителе [1]. Задача надежного сопряжения частотной перестройки электрически пассивного высокочастотного (ВЧ) узла — преселектора с перестройкой первого гетеродина прибора (так, чтобы разность их частот настройки всегда была равна первой промежуточной частоте) связана с определенными техническими трудностями и в большинстве случаев решается