

Государственный первичный эталон единицы коэффициента гармоник для сигналов с основной гармоникой в диапазоне частот (10...200000) Гц ГЭТ 188—2010

Ф. А. ПЛАТОНОВ, Е. О. АХРАМЕЕВА, В. А. БАБАРЬКИН, А. В. ПРУГЛО,
С. В. БЕЗДЕНЕЖНЫХ, О. В. КАМИНСКИЙ, К. А. СТАЛЬНОВА

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

Описаны принцип действия и структура государственного первичного эталона единицы коэффициента гармоник ГЭТ 188—2010.

Ключевые слова: эталон, коэффициент гармоник.

The functioning principle and structure of developing of the State primary standard GET 188—2010 are described. The metrological characteristics of the State primary standard are presented.

Key words: standard unit, nonlinear distortion factor.

Электрические сигналы низкой частоты широко используются во многих областях науки и техники. Особенно распространено применение этих сигналов в технике связи, радиоэлектронике, телевизионной и радиовещательной технике, системах контроля и автоматики, навигационных системах. На основе передовых технологий в информационно-телекоммуникационных системах быстро развиваются новые и совершенствуются имеющиеся средства связи, улучшаются технические параметры и повышаются требования к средствам передачи сигналов низкой частоты, качеству звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуры. Для соответствия требованиям мировых стандартов в данной области необходимы средства, обеспечивающие метрологический контроль параметров аппаратуры связи в процессе разработки, изготовления и эксплуатации.

Одним из важных параметров радиотехнических сигналов является характеристика искажений формы сигнала [1, 2] — коэффициент гармоник K_r , определяемый как

$$K_r = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2} \cdot 100, \quad (1)$$

где U_1 , U_i — амплитуды 1-й (основной) и i -й гармоник, соответственно.

Измерения K_r чаще всего проводятся в диапазоне частот 10 Гц—200 кГц. Средства измерений (СИ) K_r являются достаточно распространёнными, их парк насчитывает десятки тысяч штук. Для метрологического обеспечения таких СИ

во ВНИИФТРИ был разработан и утверждён Государственный первичный эталон единицы коэффициента гармоник в диапазоне (0,001...100) % для сигналов с основной гармоникой в диапазоне частот (10...200000) Гц (ГЭТ 188—2010) [3].

Предыстория создания эталона. До недавнего времени поверочную схему СИ K_r возглавлял государственный первичный эталон [4], созданный в 1992 г. в Институте метрологии (г. Харьков). Он воспроизводил коэффициент K_r в диапазоне 0,003—100 % в интервале частот первой гармоники 10 Гц — 200 кГц. Пределы неисключённой систематической абсолютной погрешности $\pm(\Theta_a + \Theta_m)$, где Θ_a , Θ_m — соответственно аддитивная и мультипликативная составляющие, значения которых в зависимости от частоты f и K_r приведены в табл. 1. Среднее квадратическое отклонение (СКО) S_0 результата измерений при воспроизведении K_r не превышает 0,03 % для трёх независимых наблюдений.

Таблица 1

Абсолютная неисключённая систематическая погрешность государственного первичного эталона коэффициента гармоник в 1992 г.

Частота f , кГц	K_r , %	Θ_a , %	Θ_m , %
0,01—0,02	0,01—100	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2} K_r$
0,02—0,10	0,01—100	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-2} K_r$
0,1—20,0	0,003—100	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-2} K_r$
20—100	0,01—100	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-2} K_r$
100—200	0,01—100	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-2} K_r$

Вместе с повышением требований к средствам передачи сигналов низкой частоты были усовершенствованы измерители и калибраторы K_r , уменьшены их погрешности. Соответственно возникла потребность в разработке нового первичного эталона с улучшенными метрологическими характеристиками.

Цифровые методы измерений имеют неоспоримое преимущество, поэтому стали появляться публикации о применении аналого-цифровых преобразователей (АЦП) для измерений K_r , были рассмотрены различные алгоритмы обработки цифровых кодов мгновенных значений исследуемого сигнала и их погрешности [5—8]. Вместе с тем, быстрыми темпами улучшаются параметры АЦП и цифроаналогового преобразователя (ЦАП).

В 2008 г. на базе АЦП AD9260 появились серийно выпускаемые измерители коэффициента K_r : установка измерительная К2С-84 (КБ «Квазар») и калибратор-измеритель нелинейных искажений СК6-20 (ЗАО «НПЦентр»). Их метрологические характеристики вплотную приблизились к эталонным значениям. Для воспроизведения коэффициента K_r в установке К2С-84 использован цифровой синтез Direct Digital Synthesizer (DDS) [9], при этом основная и высшие гармоники синтезируются отдельно и потом суммируются. В сигнале основной гармоники побочные спектральные компоненты и шумы, присущие DDS, подавляются высококачественными переключаемыми фильтрами. В генераторе — калибраторе гармонических сигналов СК6-122 (ЗАО «НПЦентр») — с помощью DDS синтезируется сразу полный сигнал, содержащий основную и высшие гармоники в определённой пропорции, обеспечивающей воспроизведение заданного значения K_r .

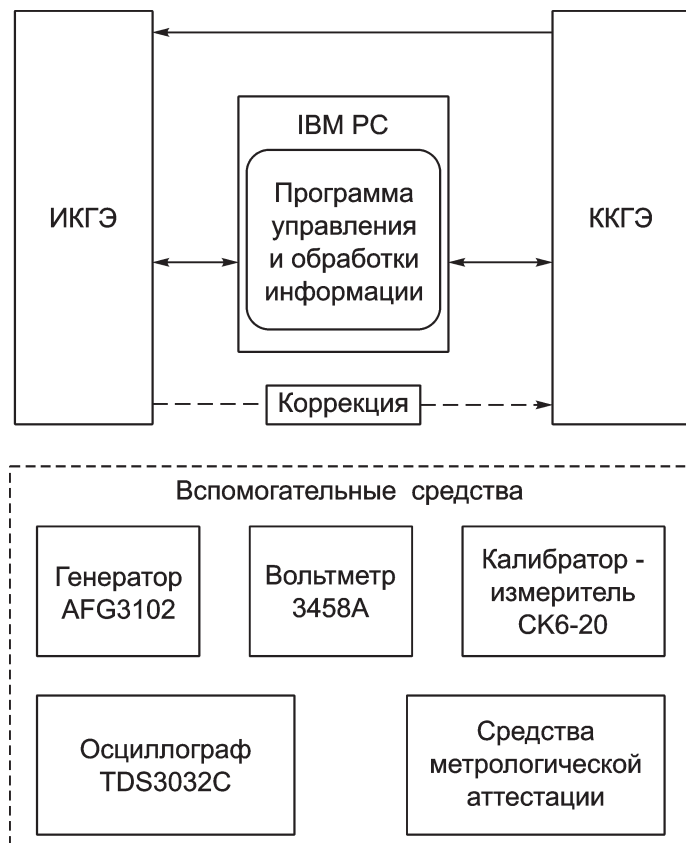


Рис. 1. Структурная схема ГЭТ 188—2010

Во ВНИИФТРИ исследования вариантов построения средств измерений K_r эталонного уровня на основе современных техник аналого-цифрового преобразования и цифрового синтеза сигналов начались в 1999 г. На основе этих исследований в 2010 г. был создан и в 2011 г. утвержден ГЭТ 188—2010.

Состав эталона и методы воспроизведения единицы.

ГЭТ 188—2010 состоит из измерителя коэффициента гармоник эталонного (ИКГЭ), калибратора коэффициента гармоник эталонного (ККГЭ), генератора сигналов произвольной формы AFG3102, калибратора-измерителя нелинейных искажений СК6-20, осциллографа TDS3032C, вольтметра универсального цифрового 3458A, средств метрологической аттестации, персонального компьютера. Структурная схема эталона показана на рис. 1.

Воспроизведение единицы K_r в эталоне осуществляется с помощью ИКГЭ, являющегося основой эталона и содержащего 24-разрядный АЦП. ИКГЭ обеспечивает динамический диапазон, свободный от гармоник (SFDR), до 120 дБ, формирует выборку из N цифровых отсчетов, соответствующих мгновенным значениям входного сигнала, и записывает её в промежуточной памяти. Максимальное число отсчетов в выборке 1048576. Максимальная частота дискретизации 2,5 МГц может меняться в зависимости от частоты основной гармоники. На основании каждой выборки программа управления и цифровой обработки информации вычисляет амплитуды гармоник и их начальные фазы. Максимальное число обрабатываемых гармоник равно 10. Для определения амплитуд и начальных фаз гармоник применяется оптимальный алгоритм оценивания параметров гармонического сигнала с известной частотой на фоне аддитивной помехи [10]. Для случая дискретного сигнала амплитуда и начальная фаза i -й гармоники будут следующими:

$$U_i = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos(2\pi f_i k / f_d) \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin(2\pi f_i k / f_d) \right)^2}; \quad (2)$$

$$\varphi_i = \arctg \left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin(2\pi f_i k / f_d)}{\sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos(2\pi f_i k / f_d)} \right), \quad (3)$$

где $x(k)$ — отсчёты АЦП; f_d — частота дискретизации; f_i — частота i -й гармоники.

При расчётах по (2), (3) необходимо знать точные значения частот гармоник. Частота основной (первой) гармоники задается оператором. Программа управления и обработки информации уточняет значение этой частоты (используя в качестве опоры частоту тактового генератора ИКГЭ) методом нахождения максимума по частоте f_1 в формуле (2) при $i = 1$. Частоты остальных гармоник определяются умножением уточнённой частоты первой гармоники на номер соответствующей гармоники. Вычисленные таким образом амплитуды гармоник корректируются посредством умножения на коэффициенты, полученные при метрологической аттестации эталона. Проведённая коррекция позволяет уменьшить погрешность, связанную с частотной зависимостью амплитудных характеристик АЦП и входных цепей ИКГЭ. Коэф-

коэффициент K_r вычисляют по (1). Измерения проводят сериями, количество измерений в серии задает оператор. С помощью программы управления и обработки информации вычисляется среднее значение K_r в серии и СКО среднего.

Калибратор ККГЭ построен по принципу цифрового синтеза и формирует выходной гармонический сигнал с заданным K_r , содержащий сразу основную и высшие гармоники. Оператор задает частоту основной гармоники и количество гармоник (максимальное количество гармоник 10), распределение амплитуд гармоник по частоте (равномерно спадающее, равновеликое, с заданием амплитуды каждой гармоники). Структурная схема ККГЭ приведена на рис. 2. В зависимости от заданных условий программа IBM PC формирует код частоты, таблицу формы сигнала и передает её процессору ADSP-BF537 с последующим размещением в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ). Кроме того, процессор выполняет функции фазового аккумулятора. Модуль синхронизации является синтезатором, формирующим импульсы Fclk, задающие скорость обновления информации для ЦАП, и другие необходимые тактовые импульсы. В зависимости от частоты основной гармоники, частота выборки точек из таблицы выходного сигнала в ОЗУ (Fclk) соответствует значению, при котором образуется минимальное количество побочных спектральных компонентов из-за усечения кода фазы (phase truncation). Данное значение также наиболее подходит для создания условий подавления гармоник, «отражённых» от частоты Fclk.

Для уменьшения погрешности воспроизведения калибратором ККГЭ заданного K_r проводится коррекция формы сигнала с помощью измерителя ИКГЭ. В первом приближении формируется таблица формы сигнала для ККГЭ в соответствии с выражением

$$U_0(T_k) = \sum_{i=1}^{10} U_{0i} \sin(2\pi f_1 T_k),$$

где U_{0i} — расчётная амплитуда i -й гармоники по заданному K_r и закону распределения по частоте; T_k — дискретные моменты времени.

Сигнал, синтезированный на основе приближенной таблицы формы сигнала, подается на вход ИКГЭ, анализируется, определяются амплитуды, начальные фазы содержащихся в нем гармоник и отклонение получившегося значения K_r от заданного. Исходя из этих данных, вычисляются скорректированные амплитуды U_i и начальные фазы φ_i гармоник. Используя эти амплитуды и начальные фазы гармоник, программа формирует новую таблицу формы сигнала в соответствии с выражением

$$U(T_k) = \sum_{i=1}^{10} U_i \sin(2\pi f_1 T_k + \varphi_i).$$

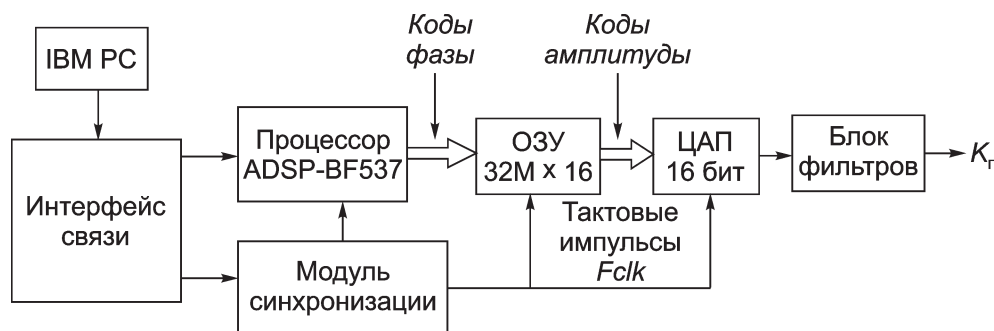


Рис. 2. Структурная схема эталонного калибратора коэффициента гармоник

На основе полученной таблицы в ККГЭ создаётся скорректированный сигнал. Таким образом, погрешность воспроизведения единицы K_r с помощью ККГЭ приближается к погрешности измерений ИКГЭ.

Таблица 2

Абсолютная неисключённая систематическая погрешность Θ , %, измерений K_r в зависимости от частоты и значений K_r

f_1 , Гц	K_r , %					
	0,001	0,01	0,1	1	10	100
10	0,00071	0,00071	0,00071	0,00083	0,0043	0,042
100	0,00015	0,00016	0,00016	0,00045	0,0042	0,042
1 000	0,00010	0,00010	0,00011	0,00043	0,0042	0,042
20 000	0,00056	0,00056	0,00056	0,00070	0,0042	0,042
100 000	0,00056	0,00056	0,00056	0,00070	0,0042	0,042
200 000	0,00084	0,00084	0,00084	0,00094	0,0043	0,042

Метрологические характеристики эталона и методы передачи единицы. Эталон обеспечивает воспроизведение единицы K_r с абсолютной неисключённой систематической погрешностью Θ в диапазоне $1 \cdot 10^{-4}$ — $4 \cdot 10^{-2}$ %. Значения Θ в зависимости от частоты основной гармоники и значения K_r приведены в табл. 2.

Для десяти независимых измерений СКО результата измерений S не превышает рассчитанное по формулам $S = 2,5 \cdot 10^{-5} K_r + 5 \cdot 10^{-6}$ % для $K_r = 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10$ %; $S = 3 \cdot 10^{-3}$ % для $K_r = 100$ %.

Неопределённость результатов измерений ГЭТ 188—2010

Стандартная неопределённость

по типу А	$5 \cdot 10^{-6}$ — $3 \cdot 10^{-3}$ %
по типу В	$4 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-2}$ %
Суммарная стандартная неопределённость	$4 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-2}$ %
Расширенная неопределённость ($k=2$)	$8 \cdot 10^{-5}$ — $4 \cdot 10^{-2}$ %

В соответствии с государственной поверочной схемой для СИ K_r [3] передача единицы K_r вторичным эталонам осуществляется методом прямых измерений, если в качестве ведущего звена вторичного эталона является калибратор, или методом непосредственного сравнения, если в качестве ведущего звена вторичного эталона используют измеритель. Для передачи единицы K_r рабочим эталонам 1-го разряда применяют метод прямых измерений.

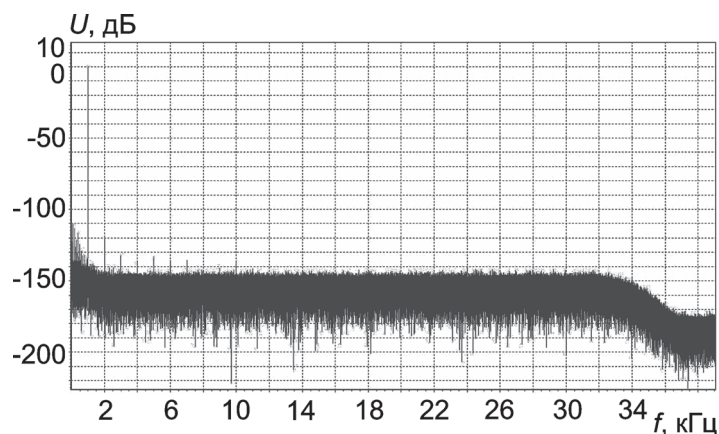


Рис. 3. Спектрограмма, полученная с помощью быстрого преобразования Фурье, выборки длиной 524 288 отсчетов мгновенных значений амплитуд гармонического сигнала напряжением 1 В, частотой 1 кГц, на входе эталонного измерителя коэффициента гармоник

Результаты исследований ГЭТ 188—2010. На рис. 3 показана спектрограмма полученной с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) выборки, содержащей 524288 отсчетов АЦП. На вход ИКГЭ подавали гармонический сигнал с генератора сигналов со сверхнизким уровнем искажений DS360 (Stanford Research Systems, Inc.) напряжением 1 В, частотой 1000 Гц. Из спектрограммы следует, что уровень собственных шумов менее -145 дБ.

Для оценки K_r , вызванного собственными нелинейными искажениями ИКГЭ, использовали этот же генератор со сверхнизким уровнем искажений DS360 и фильтры низкой частоты. Получены следующие данные: $K_r = 7 \cdot 10^{-5}$; $4 \cdot 10^{-4}$; $4 \cdot 10^{-4}$; $6 \cdot 10^{-4}$ % на частотах 1; 20; 100; 200 кГц, соответственно.

Экономические критерии при разработке и эксплуатации эталона установить достаточно сложно, так как отсутствуют достоверные методики оценки экономического эффекта при повышении точности измерений. Однако именно точность измерений и определяет экономический эффект в результате применения эталона.

В результате утверждения настоящего эталона при аттестациях вторичных и рабочих эталонов отпадает необходимость обращения к эталону, находящемуся за рубежом (г. Харьков, Украина).

Литература

1. **Измерения** в электронике. Справочник / Под ред. В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. **Горохов П. К.** Толковый словарь по радиоэлектронике. Основные термины. М.: Русский язык, 1993.
3. **ГОСТ Р 8.762—2011.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента гармоник.
4. **ГОСТ 8.110—97.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента гармоник.
5. **Петров Н. Б.** Некоторые погрешности аналого-цифрового измерения нелинейных искажений // Измерительная техника. 1979. № 5. С. 51.
6. **Минц М. Я., Чинков В. Н.** Оценка погрешности дискретизации цифровых измерительных приборов, основанных на цифровой обработке мгновенных значений сигналов // Метрология. 1987. № 11. С. 43—49.
7. **Минц М. Я., Чинков В. Н.** Микропроцессорные измерители нелинейных искажений: алгоритмы цифровой обработки измерительного сигнала и оценка погрешностей // Измерительная техника. 1995. № 4. С. 56—59.
8. **Минц М. Я., Чинков В. Н.** Метод определения оптимальной частоты дискретизации при аналого-цифровой обработке сигналов // Измерительная техника. 1997. № 10. С. 31—41.
9. **Vankka J.** Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications. Doctor's thesis. Helsinki, 2000.
10. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.

Дата принятия 01.12.2016 г.