

# ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ ВЫСШЕЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ВЧ-НАПРЯЖЕНИЙ

**Измерение уровня переменного высокочастотного напряжения является одним из самых распространенных видов радиоизмерений. Используемые сегодня средства измерений много лет успешно решали эту задачу, но уже выработали свой ресурс и морально устарели. Недавно были разработаны новые высокочастотные вольтметры, которые могут быть использованы и как рабочие средства измерений, и как вольтметры – эталоны 1-го разряда.**

При выполнении измерений уровня переменного высокочастотного напряжения используются специализированные вольтметры переменного напряжения или универсальные вольтметры, имеющие встроенный канал измерения переменного напряжения. Эти вольтметры представляют многочисленную группу средств измерений, которые в соответствии с Федеральным законом "О единстве измерений" должны подвергаться первичной и периодической поверке с использованием образцовых средств измерений (ОСИ), или эталонов, имеющих необходимый (как правило, трехкратный) метрологический запас по точности по сравнению с поверяемым прибором.

Иерархия средств измерений, используемых для поверки, определяется специальной Государственной поверочной схемой РФ для средств измерения переменного электрического напряжения [1]. Высшее звено этой схемы – Государственного первичный эталон высокочастотного переменного напряжения ГЭТ 27-2009 [2]. От него размер напряжения передается вольтметрам – эталонам 1-го разряда. При этом определяются индивидуальные поправочные коэффициенты [3], позволяющие учесть систематические погрешности измерений вольтметров – эталонов 1-го разряда. Вольтметры, стоящие вслед за эталоном 1-го разряда в нижнем звене поверочной схемы, поверяются путем сравнения их показаний с показаниями вольтметров – эталонов 1-го разряда.

Входная часть измерительного канала широкополосных вольтметров эталонов первого разряда выполняется в виде выносного высокочастотного пробника. Он позволяет подключаться к сигналу калиброванного уровня эталона

М.Гуревич, д.т.н, В.Крестовский, к.т.н.  
gurevitch@inbox.ru

ГЭТ 27-2009 без использования дополнительных кабелей и переходов, и избежать возможных потерь точности, связанных с их применением.

Аппаратура государственного эталона ГЭТ 27-2009 воспроизводит прецизионный гармонический сигнал заданного уровня и частоты. Стабилизация уровня сигнала обеспечивается системой автоматического регулирования, построенной на основе миниатюрного платинового болометра, встроенного в коаксиальную линию передачи. Непосредственно в том сечении коаксиальной линии передачи, где расположен болометр, имеется высокочастотный разъем, выполненный в виде гнезда для пробника поверяемого вольтметра. Платиновый болометр и пробник поверяемого вольтметра при этом оказываются включенными в одно и то же сечение коаксиальной линии передачи. Это позволяет при передаче размера высокочастотного переменного напряжения от эталона ГЭТ 27-2009 вольтметру-эталоны 1-го разряда практически полностью исключить систематические погрешности, вызванные рассогласованием измерительного тракта.

В вольтметрах – эталонах 1-го разряда, подключаемых к эталону ГЭТ 27-2009, используются пробники, построенные на диодных детекторах. Диодные детекторы пробников, благодаря простоте схемы и конструкции, имеют необходимые для эталона свойства: они сочетают высокую статическую точность и малые частотные погрешности со стабильностью этих характеристик в течение времени и в условиях действия влияющих факторов окружающей среды.

Первыми отечественными широкополосными вольтметрами-эталоны 1-го разряда, снабженными диодными пробниками, были диодные компенсационные вольтметры (ДКВ) типов ОКВ-5А; ВЗ-9, ВЗ-24, в пробниках которых использовались электровакуумные диоды. Теория работы и принципы построения ДКВ были разработаны во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева [4]. Пробник ДКВ выступает в роли компаратора, в котором измеряемое переменное напряжение гармонического сигнала сравнивается с калиброванным напряжением встроенного в вольтметр источника постоянного напряжения регулируемого уровня. В результате срав-

нения определяется значение постоянного напряжения, соответствующее уровню измеряемого переменного напряжения. Диодный детектор ДКВ построен на специальном электровакуумном диоде (6Д24Н), который выполнен в высокочастотной конструкции и обладает весьма малыми реактивностями. Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями подтверждена достаточно высокая стабильность передаточной характеристики такого диодного детектора, определяющая точность сравнения переменного и постоянного напряжений.

Отдельные экземпляры ДКВ ВЗ-49 и ВЗ-63, имеющие повышенную стабильность метрологических характеристик, отобранные из серийных приборов и прошедшие дополнительную поверку и калибровку на государственном эталоне ГЭТ-27-2009, до настоящего времени используются в качестве широкополосных вольтметров эталонов 1-го разряда.

При калибровке ДКВ определяется систематическая погрешность измерения сигналов различного уровня и частоты, воспроизводимых государственным эталоном ГЭТ-27-2009. В свидетельстве, прилагаемом к вольтметрам ВЗ-49 и ВЗ-63, прошедшим индивидуальную поверку и калибровку, приводятся индивидуальные поправочные коэффициенты для конкретного экземпляра прибора.

Применение индивидуальных поправочных коэффициентов позволяет пользователю ДКВ исключать преобладающие составляющие систематических погрешностей измерения гармонических напряжений, связанных с изменением частоты и уровня сигнала. В результате для ДКВ - эталона 1-го разряда погрешность может быть снижена в 3–4 раза по сравнению со случаем использования серийных вольтметров ВЗ-49 и ВЗ-63 – рабочих средств измерений.

Точность ДКВ увеличивается при увеличении уровня сигнала и в широком диапазоне частот (до 10–20 МГц) не зависит от частоты сигнала. Она определяется только вольтамперной характеристикой (ВАХ) диода, которая слабо изменяется в течение времени и при воздействии климатических факторов окружающей среды. Поэтому на этих частотах процедура определения поправочных коэффициентов весьма проста и заключается в подаче на вход ДКВ низкочастотного (1 кГц) гармонического сигнала нормированного уровня. Отличие показаний ДКВ от нормированного значения сигнала и определяет поправочный коэффициент, на который необходимо умножать отсчитанные по индикатору ДКВ результаты измерений. При повышенных частотах точность ДКВ зависит от частотных свойств детектора пробника и существенно отличается для пробников, использующих различные экземпляры диодов. Частотная погрешность заметна уже при частотах 30–50 МГц. Она складывается из двух составляющих. Первая из них ("пролетная погрешность") определяется временем пролета электронов в междупространстве электровакуумного диода (которое зависит от уровня и частоты сиг-

нала). Она преобладает в диапазоне частот до 300–400 МГц, проявляется в занижении показаний ДКВ при повышении частоты сигнала, и при частотах 400–600 МГц может достигать значений -5...-10 %. Вторая ("резонансная погрешность") зависит от соотношения рабочей частоты сигнала и резонансной частоты конструкции пробника (около 2500 МГц), которая определяется реактивностями его конструкции, включая емкость самого диода. Эта составляющая преобладает при частотах, превышающих 400 МГц, проявляется в завышении показаний ДКВ при увеличении частоты сигнала, и при частотах 1000–1500 МГц может достигать значений (10–20)%. Суммарная частотная погрешность сложным образом зависит от частоты и уровня сигнала.

Поэтому экспериментальное определение индивидуальных поправочных коэффициентов ДКВ на повышенных частотах осуществляется с помощью Государственного первичного эталона ГЭТ 27-2009 при нескольких уровнях и нескольких частотах сигнала. Определение поправочных коэффициентов при других уровнях и частотах проводится расчетным путем с использованием экстраполяции.

В настоящее время ДКВ не выпускаются, прекращено и производство электровакуумных диодов. Выпущенные в обращение в 70-90 гг. прошлого века ДКВ выработали свой ресурс и морально устарели.

Новые универсальные высокочастотные вольтметры В7-83 (см. рисунок) призваны заменить ДКВ, используемые как в качестве рабочих средств измерений, так и применяемые в качестве эталонов 1-го разряда [5]. Вольтметры В7-83 прошли все виды испытаний, занесены в общий и специальный разделы Государственного реестра средств измерений (№ 40374-09) и подготовлены для серийного производства. В вольтметре В7-83, как и в ДКВ, измерение высокочастотных напряжений в диапазоне от 10 кГц до 1000–1500 МГц выполняется с использованием диодных амплитудных преобразователей. Они заключены в выносной пробник диаметром 20 мм. У вольтметра В7-83 два таких пробника. Один из них (пробник П1) образует измерительный канал №2 и рассчитан на напряжения сигнала от 10 мВ до 10 В и диапазон частот от 10 кГц до 1500 МГц. Другой (пробник П2) образует измери-



**Вольтметр универсальный высокочастотный В7-83**

тельный канал №3 и рассчитан на диапазон напряжений от 1 В до 100 В и диапазон частот от 10 кГц до 1000 МГц.

В схемах пробников использованы оригинальные схемы диодных амплитудных детекторов, построенных на сборках идентичных диодов Шоттки [6–8]. Передаточная характеристика таких диодных детекторов обладает малой нелинейностью и повышенной стабильностью в широком частотном диапазоне. Она сохраняется практически неизменной в условиях действия климатических факторов окружающей среды и во времени, что подтверждено в ходе испытаний [9].

Частотная погрешность диодных детекторов пробников П1 и П2 имеет только одну составляющую ("резонансную погрешность"). Резонансная частота пробника, как и у пробника ДКВ, составляет примерно 2500 МГц. Она зависит от величины паразитных реактивностей конструкции пробника, а также от емкостей диодов и индуктивностей выводов микрокорпусов, в которые они заключены. Емкость диодов слабо зависит от уровня измеряемого сигнала, поэтому частотные погрешности для сигналов различных уровней мало отличаются друг от друга.

По указанным причинам частотная погрешность пробников П1 и П2 проявляется только на частотах, превышающих 300–400 МГц, что в несколько раз выше, чем у пробников ДКВ. Малые частотные погрешности и их слабая зависимость от уровня сигнала выгодно отличают пробники П1 и П2 от пробника ДКВ. За счет уменьшения числа поверяемых точек по уровню и частоте это позволяет существенно упростить процедуру индивидуальной поверки (калибровки) вольтметра В7-83 в качестве ОСИ 1-го разряда.

Зависимость между значениями амплитуды измеряемого переменного напряжения и постоянного напряжения, получаемого на выходе пробника, в общем случае является нелинейной. Для того, чтобы уменьшить эту нелинейность, в пробнике П1 используются два параллельных измерительных тракта – основной и вспомогательный. На вход каждого из них подается измеряемый сигнал. Характеристики трактов подбираются таким образом, чтобы выходное напряжение пробника, получаемое как определенная комбинация выходных напряжений основного и вспомогательного трактов, было линейной функцией амплитуды измеряемого переменного напряжения, а также не изменялось с течением времени и при действии влияющих факторов окружающей среды. Такое построение детектора позволило в несколько раз снизить нелинейность и увеличить стабильность передаточной характеристики детектора по сравнению с аналогичной характеристикой диодного компаратора ДКВ. Это также позволяет упростить процедуру индивидуальной поверки (калибровки) вольтметра В7-83 в качестве ОСИ 1-го разряда на низких частотах. Поскольку для детекторов пробников П1 и П2 характерна практически одинаковая частотная зависимость коэффициента передачи для сигналов разного уровня, то и попра-

вочные частотные коэффициенты будут одинаковы для сигналов всех уровней.

В детекторе пробника П2 двухканальная структура не используется, а линейаризация и стабилизация передаточной характеристики детектора обеспечивается за счет использования специальной вспомогательной схемы аддитивной коррекции, в которой применены сборки диодов Шоттки и логарифмические усилители. Такое построение детектора позволило в несколько раз снизить нелинейность передаточной характеристики в диапазоне напряжений сигнала от 1 до 100 В (по сравнению с аналогичной характеристикой диодного компаратора ДКВ), а также существенно повысить стабильность передаточной характеристики во времени и в условиях действия влияющих факторов окружающей среды.

Еще одним отличием вольтметра В7-83 от ДКВ является наличие в нем измерительного канала №1, снабженного электро-тепловым преобразователем переменного напряжения в постоянное напряжение. Он обеспечивает точное измерение среднеквадратического значения переменных напряжений, как чисто гармонической, так и искаженной формы. Этот измерительный канал перекрывает частотный диапазон от 5 Гц до 20 МГц и диапазон напряжений от 10 мВ до 150 В. В отличие от ДКВ, для которого увеличение гармоник в спектре сигнала сопровождается существенной потерей точности, этот канал практически нечувствителен к гармоническим искажениям.

Вольтметры В7-83 изготавливаются и поступают в обращение в качестве рабочих средств измерений (РСИ). Наивысшая точность вольтметров В7-83 РСИ (погрешность измерений в пределах  $\pm 0,2\%$ ) гарантируется для нормальной области частот сигнала, которая охватывает для измерительного канала №1 диапазон 20 Гц – 20 кГц, а для измерительных каналов №2 и №3 диапазон 10 кГц – 10 МГц. Погрешность на высоких частотах не выходит за пределы  $\pm 0,8\%$ ;  $\pm 2,4\%$ ;  $\pm 4,8\%$ ;  $\pm 8\%$ ;  $\pm 12\%$  соответственно на частотах 100, 300, 600, 1000 и 1500 МГц.

Высокая линейность и повышенная стабильность передаточной характеристики детекторов пробников П1 и П2 в широком диапазоне частот позволяют, как и в случае ДКВ, использовать отдельные экземпляры вольтметров В7-83 (после индивидуальной поверки и калибровки на Государственном эталоне ГЭТ 27-2009) в качестве широкополосных вольтметров – эталонов 1-го разряда. Такая возможность предусмотрена в технической документации вольтметров В7-83. Методика дополнительной поверки и калибровки [10], наряду с подтверждением стабильности и повторяемости метрологических характеристик в результате многократных измерений, предусматривает также определение индивидуальных поправочных коэффициентов для различных частот и уровней сигнала.

В качестве примера приведем результаты экспериментального исследования одного из первых выпущенных в обращение вольтметров В7-83 (образец №003.09). Его показания в измерительном канале №2 (пробник №1) были со-

поставлены с уровнем сигнала, воспроизводимого в диапазоне частот от 50 до 1500 МГц государственным эталоном ГЭТ 27-2009. В ходе экспериментов были определены как систематическая  $\theta_0$ , так и случайная  $\psi_{СКЗ}$  составляющие погрешности измерений (табл.1–3). Поправочный множитель К, который пользователь вольтметра В7-83, аттестованного в качестве эталона 1-го разряда, должен учитывать при выполнении измерений, определяется из выражения:  $K = 1 - \theta_0$ .

Значения поправочных множителей К, полученные в процессе калибровки, вносят в память контроллера, встроенного в вольтметр В7-83. Когда вольтметр В7-83 используется при проверке других средств измерений в качестве эталона 1-го разряда, то по команде пользователя, сопровождаемой информацией о частоте сигнала, частотные поправки автоматически вносятся в показания вольтметра В7-83.

Из табл.1–3 следует, что случайная составляющая погрешности измерений весьма мала и при практических измерениях ее можно не учитывать. Систематическая составляющая погрешности измерений, определяющая величину поправочного коэффициента К, растет при увеличении частоты, но ее значение существенно меньше, чем у ДКВ. Как отмечено выше, величина этой погрешности в ДКВ достигает значений 5–10% для диапазона частот 400–600 МГц и 10–20% для диапазона 1000–1500 МГц. В то же время у В7-83 для этих диапазонов она не выходит за пределы  $\pm 1\%$  и  $\pm 3\%$  соответственно. Поскольку в процессе эксплуатации прибора систематическая частотная погрешность, которую нужно учитывать при выполнении измерений, может измениться, и указанные изменения пропорциональны величине исходной погрешности, то меньшие значения систематической частотной погрешности означают большую вероятность сохранения метрологических характеристик вольтметра В7-83 в процессе эксплуатации.

Максимальное напряжение гармонического сигнала государственного эталона ГЭТ 27-2009 ограничено величиной 1 В, а для пробника П1 вольтметра В7-83 точность измерения нормируется и для значений, превышающих 1 В. Для того, чтобы подтвердить возможность применения поправочных коэффициентов, полученных на малых уровнях сигнала, при сигналах больших уровней, была определена зависимость частотной погрешности образца №003.09 вольтметра В7-83 с пробником П1 от изменения уровня сигнала (табл.4). Измерения выполнялись с использованием стандартного генератора сигнала, снабженного фильтрами нижних частот, при уровнях 1 и 3 В, путем сличения показаний вольтметра В7-83 с показаниями ДКВ (вольтметр В3-49), аттестованного по первому разряду при этих уровнях.

Данные таблицы 4 подтверждают малую зависимость частотной погрешности от изменения уровня сигнала и говорят о возможности распространить значения поправочных коэффициентов, полученных с помощью государствен-

**Таблица 1. Измеренные значения погрешностей  $\theta_0$  и  $\psi_{СКЗ}$  измерительного канала №2 образца №003.09 вольтметра В7-83 при напряжении сигнала 1 В**

Погрешность	Частота сигнала (ГГц)							
	0,05	0,15	0,3	0,6	0,8	1	1,2	1,5
$\theta_0, \%$	-0,12	-0,63	-0,9	0,035	-1,43	0,398	1	3
$\psi_{СКЗ}, \%$	0,003	0,0012	0,005	0,027	0,023	0,018	0,0216	0,0074

**Таблица 2. Измеренные значения погрешностей  $\theta_0$  и  $\psi_{СКЗ}$  измерительного канала №2 образца №003.09 вольтметра В7-83 при напряжении сигнала 0,3 В**

Погрешность	Частота ГГц							
	0,05	0,15	0,3	0,6	0,8	1	1,2	1,5
$\theta_0, \%$	-0,1167	-0,48	-0,55	0,547	-0,97	-0,786	-0,24	-2,54
$\psi_{СКЗ}, \%$	0,0057	0,0076	0,005	0,0085	0,011	0,019	0,017	0,013

**Таблица 3. Измеренные значения погрешностей  $\theta_0$  и  $\psi_{СКЗ}$  измерительного канала №2 образца №003.09 вольтметра В7-83 при напряжении сигнала 0,1 В**

Погрешность	Частота ГГц							
	0,05	0,15	0,3	0,6	0,8	1	1,2	1,5
$\theta_0, \%$	0,122	0,02	0,05	-0,3	-1,63	-2,42	-1,497	-2
$\psi_{СКЗ}, \%$	0,0366	0,017	0,0322	0,0155	0,036	0,024	0,0377	0,03

ных эталонов ГЭТ 27-2009, на весь диапазон (до 10 В) уровней сигнала пробника П1.

Для вольтметров В7-83 – эталонов 1-го разряда, прошедших поверку и калибровку на государственном эталоне ГЭТ 27-2009, как и для ДКВ, установлены улучшенные характеристики точности по сравнению с вольтметрами В7-83 – рабочими средствами измерений [3]. Нормированные значения погрешности измерения по сравнению с РСИ для них в нормальной области частот снижены в 3–4 раза. Нормированные значения погрешности в высокочастотной области также снижены в 3–4 раза и на частоте 1000 МГц не выходят за пределы  $\pm(1-1,7)\%$ .

**Таблица 4. Измеренные значения частотной погрешности В7-83 в зависимости от изменения уровня сигнала, определенные с помощью эталонного вольтметра В3-49**

Частота и уровень сигнала	Показание В3-49, В	Действительное напряжение сигнала (показание В3-49 с учетом поправки), В	Показание В7-83, В	Погрешность В7-83 по отношению к $U_{вх}$	Изменение частотной погрешности В7-83 при изменении уровня сигнала от 1 В до 3 В
600 МГц, 1В	1,000	1,057	1,074	+1,58%	-0,15%
600 МГц, 3В	3,000	3,102	3,1476	+1,43%	
800 МГц, 1 В	1,000	1,053	1,063	+0,9	-0,5%
800 МГц, 3 В	3,000	3,075	3,087	0,39%	
1000 МГц, 1 В	1,000	1,034	2,9	-0,92%	-1,2%
1000 МГц, 3 В	3,000	3,003	2,9395	-2,16%	

Обладая высокими метрологическими характеристиками, вольтметры В7-83 найдут широкое применение в качестве образцовых средств измерений (эталонов) 1-го разряда при поверке широкого класса средств измерений, включая вольтметры и генераторы переменного напряжения, калибраторы, осциллографы, частотомеры, анализаторы спектра и другие приборы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 8.648-2008. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений переменного электрического напряжения до 1000 В в диапазоне частот от 0,01 Гц до 2000 МГц. – М., Изд-во Стандартиформ, 2009.
2. **Крестовский В. В., Телитченко Г. П., Шевцов В. И.** Новый государственный первичный специальный эталон единицы электрического напряжения – вольта – в диапазоне частот  $3 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^9$  Гц ГЭТ 27-2009. – Приборы, 2009, № 7.
3. Методические указания МИ 899. Вольтметры диодные компенсационные образцовые 1-го разряда. Методика метрологической аттестации. – Изд-во стандартов, 1985.
4. **Федоров А.М.** Диодные компенсационные вольтметры. М, Изд-во стандартов, 1976 г.
5. **Гуревич М.Л., Черемохин А.В.** Новый высокочастотный цифровой вольтметр В7-83 для точного измерения уровня непрерывных и импульсно-модулированных сигналов напряжения и мощности. – Приборы, 2007, №9.
6. **Гуревич М.Л.** Точное измерение уровня СВЧ сигналов с применением детекторов, построенных на основе сборок идентичных диодов Шоттки. – Радиоизмерения и электроника, 2008, №14.
7. **Гуревич М.Л.** Диодные пробники высокочастотных вольтметров. Особенности построения и характеристики. – Радиоизмерения и электроника, 2009, № 15.
8. **Гуревич М.Л.** Новые приборы для точных измерений напряжений НЧ и ВЧ сигналов. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2009, №7.
9. **Гуревич М.Л., Козырев С.Ю., Черемохин А.В.** Особенности построения и применения вольтметра универсального высокочастотного В7-83 и результаты исследования его метрологических характеристик – Вестник метролога, 2009, №3.
10. Вольтметр универсальный высокочастотный В7-83. Методика МП-В7-83Э поверки в качестве образцовых средств измерений (эталонов) 1-го и 2-го разрядов.