

УДК 621.317.322

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАЛИБРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ю.Д. Болмусов, В.А. Мартынов

*ООО «НПП «Радио, приборы и связь», Нижний-Новгород
rpis@mail.ru*

Рассматриваются особенности построения высокочастотных калибраторов напряжения в диапазоне частот (0,1–30) МГц. Анализируются методические, схемотехнические и алгоритмические принципы повышения точности калибраторов на высоких частотах. Приводятся характеристики нового калибратора Н5-7/1, в котором реализованы изложенные принципы.

Ключевые слова: калибратор переменного напряжения, диодный детектор, термоэлектрический преобразователь.

FEATURES OF CONSTRUCTION OF HIGH-FREQUENCY CALIBRATORS OF AC VOLTAGE

Yu.D. Bolmusov, V.A. Martynov

*ООО “NPP Radio, devices and communication”, Nizhny-Novgorod
rpis@mail.ru*

The features of construction of high-frequency voltage calibrators in the frequency range (0.1–30) MHz are considered. The methodic, sheet-oriented and algorithmic principles of improving the accuracy of calibrators at high frequencies are analyzed. The characteristics of the new calibrator H5-7/1, in which the principles outlined are implemented.

Key words: ac voltage calibrator, diode detector, thermoelectric transducer.

Государственная поверочная схема (ГПС) для средств измерений переменного напряжения [1] в качестве рабочих эталонов 1-го и 2-го разрядов в диапазоне частот от 100 кГц до 30 МГц предусматривает использование термоэлектрических преобразователей напряжения (ТПН) и калибраторов напряжения. В указанном диапазоне ТПН в течение многих десятилетий безальтернативно используются в качестве эталонов 1-го и 2-го разрядов [1–2]. Калибраторы напряжения многократно превосходят ТПП по удобствам работы, диапазону напряжений, производительности измерений и возможностям передачи единицы рабочим средствам измерений. Выпускаемые отечественной промышленностью калибраторы Н4-12, Н4-16, Н4-17 в диапазоне частот до 100кГц и Н5-6, Н5-6/1 в диапазоне частот от 30 до 1500 МГц соответствуют требованиям ГПС к рабочим эталонам 1-го и 2-го разрядов.

В группе высокочастотных (ВЧ) калибраторов диапазона частот от 0,1 до 30 МГц исторически сложилась ситуация, при которой погрешности существующих калибраторов многократно уступают требованиям ГПС к рабочим эталонам 1-го и 2-го разрядов. В значительной степени это является следствием рассматриваемых ниже особенностей и проблем построения ВЧ калибраторов.

В группе ВЧ калибраторов широко используемые, но давно снятые с производства установки В1-16, В1-29 и серийно-выпускаемые калибраторы Н5-3, Н5-4 имеют нормированные погрешности в 3–5 раз (в зависимости от частоты) хуже требований для эталонов 2-го разряда. Известные зарубежные калибраторы Fluke 5720A, 5730A и 5790A с широкополосными опциями 03 и 05 при годовом межповерочном интервале на конце штатного кабеля с согласованной нагрузкой в диапазоне частот (1–30) МГц гарантируют значения погрешностей 0,4–1,4 %, что соответствует лишь требованиям ГПС к эталонам 3-го разряда. Кроме неудовлетворительной точности, известные калибраторы имеют ещё ряд недостатков, ограничивающих их более широкое применение. Во-первых, калибраторы имеют большие значения коэффициента гармоник воспроизводимого напряжения. Например, в калибраторах Fluke 5720A, 5730A при работе на нагрузку 50 Ом нормируются значения коэффициента гармоник 1–2 %. В калибраторе Н5-4 нормированы значения коэффициента гармоник 5–10 %. Такие значения коэффициента гармоник не позволяют использовать калибраторы для поверки высокоточных отечественных вольтметров В3-49, В3-63, В7-83, ВК3-78, В3-100. В указанных вольтметрах входные преобразователи выполнены на основе детекторных пробников, осуществляющих преобразование переменного напряжения в постоянное по уровню амплитудных значений. Входные преобразователи по уровню амплитудных значений реагируют на гармоники в сигнале.

Отличительной особенностью ВЧ калибраторов являются выходные тракты, которые строятся на основе согласованной коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 или 75 Ом. Поэтому погрешности воспроизведения напряжения нормируются только на согласованной нагрузке, входящей в комплект поставки с калибратором, без учёта шунтирующего действия входного сопротивления поверяемых приборов. Так, нормированы погрешности в калибраторах В1-16, В1-29, Н5-3, Н5-5, Fluke 5720A, 5730A и 5790A с широкополосными опциями. При подключении поверяемых приборов к штатной нагрузке возникает дополнительная погрешность из-за рассогласования [2], которая обычно преобладает и требует расчёта поправок. Расчёт поправок практически невозможен, так как требуется знать комплексные коэффициенты отражения от выхода калибратора и нагрузки (с учётом импеданса поверяемого прибора). Поэтому результаты измерений имеют большую степень неопределённости.

Анализ принципов построения ВЧ калибраторов показывает, что все они строятся на базе кольца системы автоматического регулирования (САР). Кольцо САР одновременно решает две задачи. Оно позволяет в плавном диапазоне напряжений (обычно до 20 дБ) устанавливать требуемые значения выходного напряжения и позволяет поддерживать эти значения стабильными в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов. Для установки выходного напряжения в более широких пределах используются коммутируемые секции согласованных с трактом аттенюаторов. В коммутируемых аттенюаторах обычно применяются реле. Нестабильность переходного сопротивления контактов (при повторном включении или выключении) у лучших высокочастотных реле имеет значение (0,02–0,05) Ом и зависит от текущего тока, температуры окружающей среды, количества срабатываний и ряда других факторов. При работе на нагрузку 50 или 75 Ом случайная погрешность воспроизведения напряжения из-за нестабильности переходного сопротивления контактных групп реле может достигать $\pm 0,1$ % и более. Вместе с тем, полная погрешность калибратора 2-го разряда на частоте 100 кГц не должна превышать 0,03 %.

На рис. 1 приведена обобщённая структурная схема кольца САР, наиболее часто используемого для регулировки и стабилизации напряжения в ВЧ калибраторах.

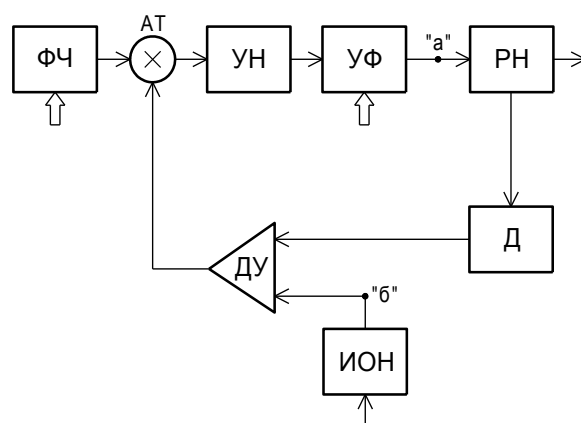


Рис. 1. Структурная схема кольца САР:

ФЧ — формирователь частоты; АТ — аналоговый электронный аттенюатор; УН — усилитель напряжения; УФ — узел фильтров; РН — разветвитель напряжения; Д — детектор; ДУ — дифференциальный усилитель; ИОН — регулируемый источник опорного напряжения

Суть работы САР состоит в том, что высокочастотное напряжение в точке «а» после детектирования детектором сравнивается с постоянным напряжением ИОН на входе ДУ. Сигнал ошибки с выхода ДУ управляет ослаблением АТ таким образом, что высокочастотное напряжение в точке «а» всегда отслеживает постоянное напряжение в точке «б» на выходе ИОН.

Для выяснения предельных возможностей калибратора на основе САР воспользуемся уравнением, связывающим выходное напряжение калибратора (U_a) в точке «а» с управляющим напряжением ($E_б$) в точке «б».

$$U_a = \frac{U_\phi K_a K_y K_0}{1 + U_\phi K_a K_y K_0 K_p K_d} E_б, \quad (1)$$

где: U_ϕ — напряжение на выходе ФЧ; K_a — коэффициент передачи АТ; K_y — коэффициент усиления УН с учётом коэффициента передачи УФ; K_p — коэффициент передачи РН на вход детектора; K_0 — коэффициент усиления ДУ по постоянному току; K_d — коэффициент передачи детектора.

Обычно усиление в кольце САР выбирают из условия $K_a K_y K_0 \gg 1$. С учётом этого, выражение (1) упрощается и принимает вид

$$U_a = \frac{1}{K_p K_d} E_б. \quad (2)$$

Из (2) следует, что выходное напряжение U_a калибратора определяется значением управляющего напряжения $E_б$ от источника ИОН и коэффициентами передачи разветвителя и детектора.

В идеальном случае, когда коэффициенты передачи детектора и разветвителя $K_d = K_p = 1$, точность и стабильность высокочастотного напряжения задаётся только ИОН. Отметим, что реализация точного и стабильного ИОН постоянного тока не является проблемой.

Однако коэффициенты передачи реальных детекторов, работающих в диапазоне частот (0,1–30) МГц, имеют нелинейные, частотно-зависимые и температурно-зависимые характеристики коэффициента передачи, т.е. одновременно являются функцией входного напряжения (U), частоты (F) и температуры окружающей среды (T)

$$K_d = \varphi(U; F; T). \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует, что амплитудная, частотная и температурная погрешности напряжения на выходе САР, и соответственно калибратора, в первую очередь определяются характеристиками детектора обратной связи.

В качестве детекторов в следящих системах ВЧ калибраторов используют преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратических (RMS) значений на базе электротепловых преобразователей [3, 4] и преобразователи переменного напряжения в постоянное, построенные с использованием высокочастотных диодов Шоттки [5, 6].

Электротепловые преобразователи не реагируют на содержание гармоник в сигнале, имеют хорошую температурную стабильность, и в этом их основные достоинства. Основные недостатки: низкий коэффициент преобразования переменного напряжения в постоянное напряжение (не более 2–4 мВ/мВт), большой уровень мощности, отводимый к преобразователю, малый рабочий диапазон по напряжению и высокая стоимость. Высокая стоимость объясняется тем, что в достаточном количестве серийно преобразователи

не выпускаются, а изготавливаются небольшим количеством фирм в виде заказных микросхем. Частотная погрешность электротепловых преобразователей на частоте 30 МГц достигает 0,5–1 % и требует схемной или программной коррекции. Для реализации преобразователя с линейной амплитудной характеристикой используют метод взаимно-обратных преобразований с использованием двух идентичных по характеристикам преобразователей [3, 4].

Преобразователи с использованием высокочастотных диодов Шоттки в диапазоне частот до 30 МГц имеют почти идеальную частотную характеристику, но требуют специальных решений для получения линейной амплитудной характеристики и стабильного коэффициента преобразования в диапазоне температур. Коэффициент преобразования детекторов на полупроводниковых диодах на два порядка больше, чем у детекторов на базе электротепловых преобразователей. Входное сопротивление детекторов на полупроводниковых диодах в диапазоне частот до 30 МГц имеет значение более 10 кОм. Детектор не нагружает коаксиальный тракт и обычно не требует использования разветвителя напряжения (рис. 1). Это упрощает реализацию кольца САР и повышает стабильность выходного напряжения за счёт исключения нестабильности коэффициента передачи разветвителя. Основным недостатком диодных детекторов — это реакция на гармоники напряжения. Однако если решена задача формирования напряжения с малым коэффициентом гармоник, то использование в САР диодных детекторов является предпочтительным, поскольку делает калибратор универсальным в плане проверки и калибровки СИ со всеми типами входных преобразователей.

Сложность формирования выходного напряжения калибратора с малыми значениями коэффициента гармоник в диапазоне частот от 0,1 до 30 МГц обусловлена несколькими причинами. Во-первых, в узле фильтров для фильтрации гармоник нельзя использовать малогабаритные катушки индуктивности с ферритовыми сердечниками. Наличие ферритов в катушках делает их нелинейными и при больших уровнях сигнала приводит к генерации гармоник самими фильтрами. Второй причиной является необходимость построения мощного линейного усилителя (работающего в классе А) с достаточно малым уровнем гармоник. В противном случае приходится использовать большое количество коммутируемых фильтров высокого порядка.

Характеристики калибратора на основе САР с диодным детектором значительно улучшаются, если в качестве ИОН (рис. 1) использовать стабильный источник низкочастотного (5–20 кГц) переменного напряжения, а САР выполнить с двумя идентичными детекторами на интегральной диодной сборке [5, 6].

Для выходного напряжения САР с двумя детекторами аналогично (2) можно записать

$$U_a = \frac{K_{д1}}{K_p K_{д2}} U_{и}, \quad (4)$$

где $K_{д2}$, $K_{д1}$ — коэффициенты передачи детектора обратной связи и детектора на выходе ИОН; $U_{и}$ — переменное напряжение на выходе ИОН.

Поскольку оба детектора работают при одинаковых амплитудах входных сигналов и одинаковой температуре, то в соответствии с (3) и (4) калибратор будет иметь температурно независимую и линейную амплитудную характеристику.

Из-за разности коэффициентов передачи при работе двух детекторов на разных частотах из (4) можно ожидать возникновение частотной погрешности. Расчёт частотной погрешности детектора и экспериментальные результаты показали, что частотная погрешность в диапазоне частот до 30 МГц при использовании диодных сборок ВАТ-62 и HSMS-28 весьма мала и не превышает 0,03%.

Как отмечалось выше, основным недостатком известных ВЧ калибраторов является доминирующая погрешность из-за рассогласования нагрузки. Указанную погрешность можно исключить, если напряжение калибровать непосредственно на входе нагрузки, например, диодным детектором проходного типа.

Другие особенности построения высокочастотных калибраторов и принципы повышения их точности рассмотрим на примере разработанного калибратора Н5-7/1, укрупнённая структурная схема которого приведена на рис. 2.

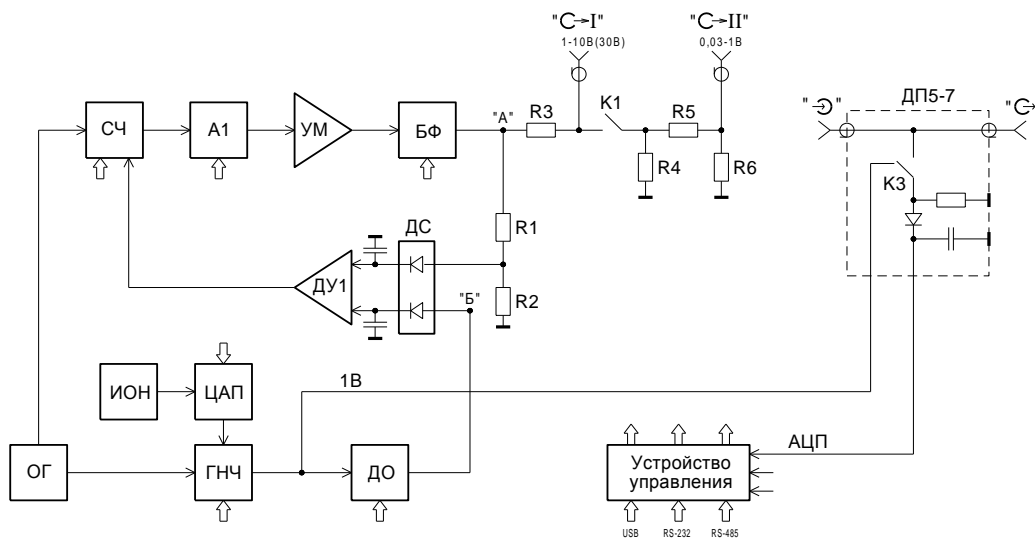


Рис. 2. Структурная схема калибратора Н5-7/1:

СЧ — синтезатор частоты; А1 — электронный дискретный аттенуатор; УМ — усилитель мощности; УФ — узел фильтров; ДС — диодная сборка; ДУ — дифференциальный усилитель; ОГ — опорный кварцевый генератор; ГНЧ — генератор низких частот; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь; ИОН — источник опорного постоянного напряжения; ДО — делитель образцовый

Калибратор работает на 10 фиксированных частотах: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3; 5; 10; 15; 20 и 30 МГц и воспроизводит калиброванные напряжения с номинальными значениями 1; 3; 5; 10 В на выходе «С→I» и 0,03; 0,05; 0,1; 0,3; 0,5; 1 В на выходе «С→I». Разбивка воспроизводимых напряжений на два поддиапазона и независимая калибровка напряжения на каждом из выходов позволили исключить случайную погрешность из-за коммутации аттенюаторов в выходных цепях калибратора.

Формирование частот осуществляется синтезатором частоты СЧ, работающим по принципу прямого цифрового синтеза (DDS). Отличие данной САР от рассмотренной выше в том, что вместо плавного аттенюатора АТ используется программно-управляемый электронный дискретный аттенюатор А1 с шагом 0,5 дБ и ослаблением 0–31 дБ. Для плавной регулировки сигнала используется опорный вход ЦАП, формирующий сигнал в СЧ.

Широкополосный усилитель мощности УМ формирует сигнал большого уровня (до 12 В на нагрузке 50 Ом) с коэффициентом гармоник менее 1 %. Дополнительная фильтрация гармоник до уровня 0,01–0,02 % осуществляется в УФ фильтрами нижних частот 5-го порядка.

В калибраторе использована рассмотренная выше схема САР с двумя детекторами на диодной сборке. В качестве опорного источника используется ГНЧ. Синусоидальный сигнал ГНЧ с частотой 10 кГц и стабильным уровнем формируется методом прямого цифрового синтеза. Сигнал ГНЧ через образцовый делитель напряжения (ДО) подаётся на второй диод диодной сборки ДС для установки номинальных значений напряжения на выходах калибратора. Температурная нестабильность напряжения ГНЧ не превышает 0,01 %.

Для калибровки напряжения на обоих выходах калибратора Н5-7 в плоскости подключения нагрузки используется детектор проходного типа (ДПТ). Детектор конструктивно выполнен в виде короткого коаксиального модуля с разъёмами N-типа и включается между выходом калибратора и нагрузкой (поверяемым средством). Калибровка напряжения на обоих выходах проводится при номинальном уровне 1 В.

Калибровка на подключённой нагрузке осуществляется в два этапа. Первоначально по сигналу ГНЧ с стабильным уровнем 1 В измеряется напряжение на выходе детектора ДПТ на частоте 10 кГц.

Затем на ДПТ подаётся высокочастотное напряжение с уровнем 1В установленной фиксированной частоты из диапазона (0,1–30) МГц, и снова измеряется напряжение на выходе детектора ДПТ. Далее по результатам двух измерений, с учётом поправки на частотную характеристику ДПТ, программой устанавливается уровень высокочастотного напряжения точно равным низкочастотному в реперной точке 1В.

Управление прибором осуществляется от компьютера по интерфейсам USB, RS-232 и RS-485 через устройство управления.

Устройство управления решает в приборе задачи управления узлами, измерение напряжений (с помощью 14-разрядного АЦП), хранение постоянных и перепрограммируемых данных, а также калибровочных коэффициентов конкретного экземпляра прибора. Задачи ввода, вывода, отображения информации, реализации алгоритмов калибровок и измерений выполняются ПК.

Метрологическое обеспечение калибратора базируется на использовании вторичного эталона РЭН-2М [2] и эталонной установки ЭО-01 [7]. По вторичному эталону определяются погрешности воспроизведения напряжения при номинальных напряжениях 1, 3, 5, 10 В, а с помощью установки ЭО-01 — для номинальных напряжений менее 1 В.

Пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения напряжения калибратора Н5-7/1 для РЭ 2-го разряда приведены в таблице.

Таблица

Номинальное напряжение, В	Пределы относительной погрешности, % на частотах			
	100 кГц	1 МГц	10 МГц	30 МГц
10,0; 5,0; 3,0; 1,0; 0,5	0,03	0,06	0,2	0,3
0,3; 0,1	0,04	0,12	0,2	0,4
0,05; 0,03	0,1	0,6	0,7	0,8

Кроме использования в качестве РЭ 2-го разряда, в калибраторе Н5-7/1 предусмотрен режим работы с ТПН в диапазоне напряжений от 0,5 до 30 В с автоматической настройкой и калибровкой на номинальное сопротивление ТПН в диапазоне от 100 Ом до 6 кОм. В режиме работы с ТПН алгоритмы автоматической настройки и калибровки исключают возможность их перегрузки и выхода из строя.

Важнейшей характеристикой калибратора является нестабильность его выходного напряжения. Испытания показали, что нестабильность выходного напряжения за 30 минут работы (после времени самопрогрева калибратора 2 часа) не превышает 0,01 % в диапазоне частот до 1 МГц и 0,02 % — до 30 МГц.

Отличительными особенностями прибора Н5-7 по сравнению с калибраторами предшествующих поколений являются большой уровень выходного напряжения (до 10 В на 50 Ом и до 30 В на 600 Ом), повышенная точность, возможность работы в широком диапазоне нагрузок и низкий уровень гармоник выходного напряжения, позволяющий использовать калибратор для проверки вольтметров со всеми типами входных преобразователей.

Литература

1. ГОСТ Р 8.648-2015. Государственная поверочная схема для средств измерений переменного электрического напряжения до 1000 В в диапазоне частот от $1 \cdot 10^{-2}$ до $2 \cdot 10^9$ Гц. М.: Стандартиформ, 2015.
2. Телитченко Г.П., Шевцов В.И. Анализ метрологического обеспечения средств измерений переменного электрического напряжения // Главный метролог. 2003. № 5. С. 15–23.
3. Дворников О.В. Микроэлектронные преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения // Компоненты и технологии. 2005. № 2. С. 84–93.
4. Гуревич М.Л., Горшков А.В. Калибратор напряжения высокочастотный Н5-4 / Новые разработки ФГУП ННИПИ «Кварц» в области создания особо точных эталонов напряжения переменного тока: сб. статей. 2009. С. 66–72.
5. Болмусов Ю.Д., Кожеватов Д.К., Лещенко Ю.М., Поляков В.Е. Поверка и калибровка широкополосных вольтметров переменного напряжения // Главный метролог. 2011. № 6. С. 31–35.
6. Болмусов Ю.Д., Горбачев П.А., Поляков В.Е., Кожеватов Д.К., Лещенко Ю.М. Вторичный эталон напряжения переменного тока в диапазоне частот 30–2000 МГц // Главный метролог. 2017. № 1. С. 11–17.
7. Болмусов Ю.Д., Горбачев П.А. Измерения ослабления аттенуаторов в диапазоне частот 20 Гц – 100 МГц // Измерительная техника. 2014. № 11. С. 40–43.