

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ПОВЕРКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

М. С. РОЙТМАН

(Представлена 2-й научно-технической конференцией факультета автоматике  
и вычислительной техники)

Неуклонное повышение точности измерения различных физических величин и, в частности переменных токов и напряжений вызвано требованиями бурного научно-технического прогресса. В настоящее время в СССР серийно выпускаются вольтметры кл. 0,1 ÷ 0,2 [1, 2], и ведутся интенсивные работы по созданию электронных измерителей кл. 0,05 ÷ 0,1. Для проверки первых необходима поверочная аппаратура с погрешностью 0,03 ÷ 0,05%, а вторых — порядка 0,01%. За рубежом уже выпускаются вольтметры с  $\delta \sim 0,025\%$  [3]. Следовательно, в перспективе, нужна даже еще более высокоточная поверочная аппаратура. Наиболее точными приборами, серийно выпускаемыми и предназначенными для градуировки и поверки электронных вольтметров, являются компенсационные диодные вольтметры типов ВЗ-9, ВЗ-24 и В4-11, измеряющие в диапазоне частот 20 гц—1000 мгц с погрешностью (0,2—4)%. Эти приборы обеспечивают требования сегодняшнего дня по точности поверки измерителей напряжения в высокочастотном диапазоне частот, но не решают задачу поверки в области звуковых частот.

Таким образом, мы пока еще не располагаем серийной поверочной аппаратурой переменного тока с требуемой погрешностью.

Каковы же достигнутые уровни точности измерения напряжения переменного тока в звуковом диапазоне частот? В СССР и США они примерно одинаковы и характеризуются погрешностью 0,01% [4]. Следовательно, требования к точности поверочной аппаратуры низшего звена (0,01%) совпадают с имеющейся точностью в высшем звене. Это означает, что нужны весьма интенсивные исследования по снижению погрешности исходных методов и аппаратуры\*), а также по созданию качественной поверочной аппаратуры. Требования, предъявляемые к образцовой измерительной (поверочной) аппаратуре высшего и низшего звена существенно различны. Для высшего звена не очень важно время, затрачиваемое на измерение, условия эксплуатации аппаратуры и ее стоимость. Другими словами, оправдан подход по принципу — «точность — любой ценой». Очевидно, что для поверочной аппаратуры низшего звена такой подход совершенно недопустим. Появляется целый ряд ограничений, в значительной мере противоречивых и в сильной сте-

\*) Такие исследования проводятся во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева под руководством Т. Б. Рождественской, и имеется определенная уверенность, что в ближайшее время точность исходной образцовой измерительной аппаратуры будет доведена до (0,003 ÷ 0,001%).

пени затрудняющих задачу создания качественной поверочной аппаратуры. Каковы же эти ограничения, выполнение которых весьма желательно? В силу важности затронутого вопроса рассмотрим его несколько подробнее.

Современная измерительная техника характеризуется весьма обширной номенклатурой измерительных приборов. Например, только электронных измерителей напряжения в нашей стране выпускается значительно более 50 типов. И эта номенклатура с каждым годом увеличивается. Отсюда даже по чисто экономическим причинам следует, что поверочная аппаратура должна быть возможно более универсальной (конечно в оправданных пределах). Это приводит к ограничению допустимого значения нелинейных искажений генератора\*). Действительно, если гармоники напряжения малы, то можно одной и той же аппаратурой поверять вольтметры различных систем — пикового\*\*), среднего и действующего значений. Поскольку прецизионные амплитудные вольтметры имеют погрешность  $\pm 0,2\%$ , то допустимые нелинейные искажения напряжения  $\leq 0,05\%$ . Вольтметры среднего значения в основном реагируют на нечетные гармоники с коэффициентом  $\frac{1}{n}$ , где  $n$  — номер гармоники, и для их поверки\*\*\*) коэффициент третьей гармоники должен быть меньше  $0,03\%$ .

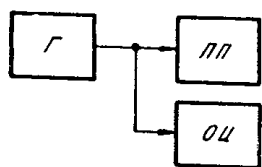


Рис. 1.

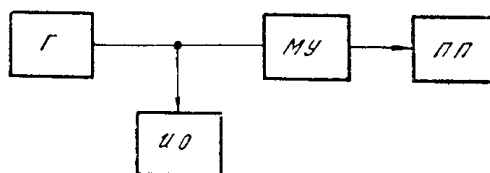


Рис. 2.

Наряду с указанными требованиями к метрологическим характеристикам необходимо выполнение требований минимальной стоимости аппаратуры, особенно ее эксплуатации. Чрезвычайное значение для образцовой поверочной аппаратуры низших звеньев имеют время поверки и возможность «самоповерки».

В общем случае для определения основной и частотной ошибки вольтметра необходимы высокостабильный генератор с малыми нелинейными искажениями, образцовый измеритель напряжений и масштабные устройства (образцовые делители или усилители).

Имеются два принципиально отличных варианта поверки измерительного прибора.

В общей трактовке первый вариант является сравнением двух измерителей, один из которых образцовый, второй — контролем реакции поверяемого прибора на заведомо известную величину. Первый осуществляется по функциональной схеме, приведенной на рис. 1, где: Г — генератор, ОИ — образцовый измеритель, ПП — поверяемый прибор.

Поверка заключается в регистрации величин взаимных отклонений в показаниях ОИ и ПП. Второй вариант имеет две существенно различные модификации.

\*) Применение генераторов прямоугольной или любой другой формы несинусоидального напряжения для определения основной и частотной погрешности вольтметров связано с рядом затруднений [5] и поэтому не может быть рекомендовано.

\*\*) В некоторых случаях поверка вольтметров пикового значения на синусоидальном напряжении не является достаточной, т. к. требуется знание влияния скважности.

\*\*\*) Имеется в виду вольтметры кл. 0,05%.

В первой (рис. 2) напряжение с выхода стабильного источника (Г) контролируется индикатором отклонения уровня сигнала от установленной величины\*) (ИО). Необходимые градации выходного сигнала получают за счет применения масштабных устройств (МУ).

Во второй модификации (рис. 3) напряжение с выхода генератора-калибратора\*\*) (ГК) подается на поверяемый прибор (ПП).

В отношении скорости поверки второй вариант предпочтителен, так как отпадает необходимость в отсчете показаний образцового измерителя.

Второй вариант может иметь весьма существенные достоинства и по достижимой точности. Это определяется тем, что точность измерительного прибора, работающего в окрестностях одной оптимальной точки, выше, чем при его работе в диапазоне значений.



Рис. 3.

Таким образом, в принципиальном плане выдавать точное значение  $U$  легче, чем измерять его.

Вышесказанное справедливо только, если погрешность масштабных устройств значительно ниже погрешности широкодиапазонного ОИ.

Поверка как по первому варианту, так и по первой модификации второго требует наличия источника, напряжение которого по крайней мере за время поверки неизменно. В противном случае будут иметь место недопустимые флуктуации показаний приборов. Это очевидное требование приводит к необходимости стабилизации выхода генератора. Но если индикатор отклонения напряжения обладает приемлемой стабильностью, то имеет смысл сигнал с выхода ИО использовать для автоматического воздействия на генератор и создания единого поверочного комплекса в виде генератора-калибратора [6]. Это дает возможность резкого упрощения аппаратуры за счет совмещения функций измерительным преобразователем, ускорения и облегчения поверки, улучшения метрологических характеристик (уменьшается выходное сопротивление источника, его флуктуации и т. д.).

Однако следует иметь в виду, что измерительный преобразователь применим в системе генератора-калибратора, только если он может иметь электрический выход и по своим характеристикам, прежде всего динамическим, «вписан» в систему автоматики.

Все сказанное можно резюмировать следующим образом:

1. Во всех тех случаях, когда имеются качественные масштабные устройства, следует отдать предпочтение поверке по методу контроля реакции ПП на сигнал известной величины.

2. Любой вариант поверочной схемы не освобождает от необходимости иметь высокостабильный источник переменного напряжения.

Учитывая это и ряд других немаловажных обстоятельств, наиболее предпочтительно построение поверочной аппаратуры в виде генератора-калибратора\*.

Непеременной частью ГК является измерительный преобразователь (ИП). Именно он, в конечном итоге, определяет потенциальную точность ГК.

Исключая из рассмотрения преобразователи амплитудного значения прежде всего по причине их высокой чувствительности к гармонич-

\*) ИО фактически является образцовым измерителем сигнала, работающим в очень узком диапазоне изменений сигнала (в окрестностях «точки»).

\*\*) Определение «генератор-калибратор», под которым подразумевается источник, значение выходной величины которого строго известно, укоренилось в технической литературе, особенно зарубежной. Более правильно было бы именовать такие источники образцовыми или мерами напряжения.

кам и помехам, сравним возможности ИП среднего и действующего значений. Наиболее совершенными ИП среднего значения являются преобразователи на базе усилителей с выпрямителями в цепи отрицательной обратной связи [7—10]. Такие преобразователи получили название конверторы.

В области низких частот конверторы обладают весьма малыми неустойчивостью ( $< 0,01\%$ ) и погрешностью ( $\leq 0,01 + 0,02\%$ ). Но уже на частоте в 20 кГц погрешность возрастает до 0,05% и более.

Это обусловлено рядом причин. Во-первых, с увеличением частоты снижается эффективность отрицательной обратной связи в операционных усилителях.

Во-вторых, с увеличением частоты начинают влиять переходные процессы в диодах и паразитные реактивности в ИП.

Таким образом, из-за значительной частотной ошибки конверторов на их базе можно создать высокостабильную и качественную поверочную аппаратуру только для области звуковых частот.

Конверторам свойственны и другие недостатки, основными из которых являются чувствительность к гармоникам и, главное, невозможность «прямой самопроверки». Конечно, может быть выполнена поэлементная проверка. Но для нее необходимо дополнительное оборудование и дополнительные затраты времени. Точность же поэлементной проверки, как правило, ниже прямой.

Частотный диапазон поверочной аппаратуры может быть сильно расширен применением измерительных преобразователей по действующему значению. Особо заметим, что именно ИП по действующему значению применены во всех метрологических организациях мира для создания образцовых измерителей напряжения в звуковом и ультразвуковом диапазоне частот. Исходным методом измерения является метод компарирования неизвестного значения переменного тока с постоянным. Очевидно, что в этом случае ИП должны одинаковым образом реагировать на одно и то же значение переменного или постоянного напряжения. В качестве ИП по действующему значению применяются главным образом специальные термопреобразователи. К сожалению, им свойствен ряд существенных недостатков [11, 12].

1. Крайне низкая чувствительность.

2. Значительная зависимость термоэДС от температуры окружающей среды.

3. Наличие ошибок перехода и из-за асимметрии.

Первые два фактора не создают пока непреодолимых препятствий при применении термопреобразователей в метрологических организациях. Правда, «цена» этих препятствий весьма велика: применяются золоченые соединительные провода, тонкое термостатирование, электростатическая и электромагнитная экранировка, специальные высокочувствительные индикаторы неравновесия [12].

Ошибка перехода и асимметрия обусловлены тем, что в одноэлементном термоэлектрическом преобразователе мы измеряем не тепловой поток, выделяемый телом накала под воздействием протекающего по телу тока, а температуру тела накала в некоторой точке. Вследствие эффектов Томсона и Пельтье температура в этой точке при одном и том же действующем значении тока будет различной на постоянном и переменном токах, а также при разных полярностях постоянного тока. Путем специальных мер и введения поправок ошибка может быть в значительной мере (но далеко не полностью) учтена\*). Для резкого уменьшения указанной ошибки во ВНИИМе был создан многоэлементный термопреобразователь [11]. Этот же путь использован и в других странах [14].

Однако из многоэлементных преобразователей резко ограничивается сверху частотный диапазон. В силу указанных недостатков термопреобразователей их применение в поверочной аппаратуре низших звеньев (учитывая, что она должна работать и не в метрологических лабораториях и допустимые ошибки находятся в пределах (0,01—0,05%) в широком диапазоне частот весьма и весьма нежелательно.

Все сказанное и вынуждает исследовать возможность использования для целей компарирования различных других ИП.

Наиболее перспективной группой измерительных преобразователей, по нашему мнению, являются фотоэлектрические преобразователи (ФП), представляющие собой сочетание элемента, разогреваемого измеряемым током, и световоспринимающего элемента. ФП могут быть созданы на базе маломощных лампочек накаливания и фотосопротивлений, фотодиодов, вентильных фотоэлементов («Солнечных» батарей) или специальных устройств с литым высокоомным микропроводом и высокочувствительных болометров. Достоинством указанных преобразователей является их высокая чувствительность, малая зависимость параметров от температуры окружающей среды и возможность сведения к пренебрежимо малой величине погрешности асимметрии и безснижения при этом частотного диапазона. Последнее достигается регулированием ориентации тела накала по отношению к световоспринимающему элементу, или интегрированием светового потока. Еще рациональнее использовать совокупность указанных мер. Основным фактором, препятствовавшим реализации больших достоинств фотоэлектрических преобразователей и снижению погрешности компарирования, являлась (и в некоторой степени еще является) недостаточная их временная стабильность.

К сожалению, все известные технические способы снижения влияния временной нестабильности ИП на погрешность измерения связаны или с большими затратами времени или с необходимостью значительного усложнения аппаратуры, что оправдано только при создании образцовых установок высшего звена.

Действительно, в простейшем случае, когда нестабильность является монотонной функцией времени, мы вынуждены подобрать второй преобразователь с примерно аналогичной характеристикой дрейфа (это не очень легко сделать) или вводить автоматическую корректировку схемы. Заметим, что применение метода автоматического замещения (часто именуется методом контрольного сигнала или методом одноканальности) не дает существенного выигрыша. Объясняется это следующим. ИП среднего и действующего значения напряжения имеют большую инерционность, так как их постоянная времени должна быть намного большей\*) длительности периода измеряемого напряжения [7]. Поэтому частота коммутации не может быть выбрана высокой. Возникающие при коммутации переходные процессы приходится «вырезать» [14] во избежание больших дополнительных ошибок, что также ограничивает сверху частоту коммутации.

Если же дрейф является случайной функцией времени, то необходима обработка значительного числа статистически независимых измерений, что связано с большими затратами времени, даже если процесс автоматизирован. Сказанное поясняет важность временной стабиль-

---

\*) При неизменных условиях окружающей среды ошибка из-за влияния эффектов Томсона и Пельтье является систематической и снижает точность абсолютных измерений, не влияя на точность относительных измерений.

\*) Имеющееся избыточное решение по увеличению быстродействия ИП [15] неизбежно связано с потерей точности.

ности ИП (в большинстве случаев вернее было бы говорить о величине кратковременной нестабильности) [11]. Наиболее сильное влияние на стабильность ФП оказывает вибрация комплекта [16]. Объясняется это несовершенством контакта между нитью и траверсами и, главное, влиянием промежуточной поддерживающей траверсы в серийно выпускаемых маломощных лампочках накаливания (НСМ 6×20 и НСМ 9×60).

Из сказанного следует настоятельная необходимость детальных исследований с целью создания метрологических лампочек.

Реальные возможности в этом направлении весьма велики. Например, среди образцов опытных лампочек накаливания, разработанных по нашему заказу А. И. Лысовым, имеются экземпляры с нестабильностью менее 0,001% за час\*) [17], что находится на уровне лучших термоэлектрических преобразователей, имеющихся в метрологических организациях. Но и эти данные нельзя считать близкими к предельно возможным.

Значительно хуже обстоит дело пока с временной стабильностью световоспринимающих элементов. Временной дрейф фотоспротивлений и сильно проявляющийся эффект «дыхания» СФ2-2 и СФ3-2 [18, 19] приводят к необходимости специального подбора фотопреобразователей, что совершенно нежелательно. Новые фотоспротивления (СФ2-5 и специальные опытные) обладают существенно меньшей (примерно на порядок) приведенной нестабильностью. По мере совершенствования конструкции и технологии изготовления фотоспротивлений\*\*) они будут обладать все большей стабильностью. Обнадеживающие результаты дают исследования кремниевых фотодиодов\*\*\*). Все сказанное позволяет сделать вывод, что фотоэлектрические преобразователи являются весьма перспективными.

Большим достоинством ФП является не только возможность создания на их базе высокоточной измерительной и поверочной аппаратуры, но и возможность сильно упрощать ее [20, 21]. Другими словами, применение ФП позволяет наиболее рационально решать задачу создания поверочной аппаратуры переменного тока, работающей в широком диапазоне частот.

Исключительно важное значение при создании широкодиапазонной поверочной аппаратуры переменного тока имеют масштабные и согласующие устройства. Очень узким местом на сегодняшний день являются прецизионные делители напряжения, способные работать в диапазоне от низких до высоких частот включительно. Фактически таких делителей мы не имеем, что в сильной степени сдерживает расширение «динамического» диапазона поверочной аппаратуры. В связи с этим в создаваемых поверочных установках мы вынуждены расчленять функции прецизионного делителя и применять два делителя: один — точный, индуктивный, работающий в узком частотном диапазоне и позволяющий определить основную погрешность поверяемого прибора (дает абсолютную «привязку»); второй — малоточный, но по возможности частотно-независимый позволяет определить частотную ошибку.

---

\*) Лампочки работали при  $U \approx 1$  в и  $I \approx 32$  ма и температуре нити накала 900—1000°К.

\*\*) Особенно желателен выпуск двояных фотоспротивлений на общей подложке и в одном герметизированном баллоне.

\*\*\*) Результаты всесторонних исследований различных световоспринимающих элементов будут в скором времени опубликованы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Пигин. Электростатические приборы высокой точности. Автореферат диссертации. Л., 1962.
  2. Ю. М. Туз. Прецизионные вольтметры переменного тока. Автометрия № 7, 1967.
  3. Радиоэлектроника за рубежом. № 10 (344), 1966.
  4. Р. Ф. Акиев, А. Б. Березовский, Т. Б. Рождественская. Состояние и перспективы развития исходных методов измерения действующего значения напряжения в широком диапазоне измеряемых величин и частот. Тезисы научно-технической конференции по радиотехническим измерениям. Новосибирск, 1967.
  5. М. С. Ройтман. О калибровке вольтметров напряжением прямоугольной формы. Вопросы радиоэлектроники серия «Радиоизмерительная техника», вып. 3, 1966.
  6. М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист, Ю. М. Фомичев. Устройство для получения стабильного и калиброванного по действующему значению синусоидального напряжения. Авт. свидетельство № 196114, бюллетень № 11, 1967.
  7. Б. И. Швецкий. Электронные измерительные приборы с цифровым отчетом. Изд-во «Техника», Киев, 1964.
  8. H. Calman. Average value transfer standard. Inst. and Control Systems, № 1, 1963.
  9. P. Richman. A New Absolute A. C. Voltage Standard. Session 26, IEEE Record of convention held March, 1963.
  10. P. Richman. The application of electronics to instruments for standards and calibration, IEEE Intern. Con. Rec. 1964, V. 12, N 8.
  11. Т. Б. Рождественская. Электрические компараторы для точных измерений тока, напряжений и мощности. Изд. стандартов. М., 1964.
  12. Turgel Raymond. A comparator for thermal ac—dc transfer standards. «21 Annual ISA Conf. Proc., Vol. 21, Part. 1, 1966» (перевод Kut. N35, 1967).
  13. F. I. Wilkins. Multyfunction Thermal Converters. IEE Proceedings. Vol. 112, N 4, 1965.
  14. Б. А. Перминов, М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист. Компаратор переменного тока на фотоэлектрических преобразователях. Автометрия № 5, 1965.
  15. А. М. Ковалев. Способ измерения действующего значения переменного напряжения произвольной формы. Авт. свидетельство № 173844. Бюллетень изобр. № 16, 1965.
  16. М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист, А. И. Лысов. Фотоэлектрический преобразователь как управляемый элемент электрической цепи. Изв. вузов СССР—Приборостроение, № 6, 1966.
  17. М. С. Ройтман, В. Р. Цибульский. Фотоэлектрический преобразователь с кремниевым фотодиодом. Изв. ТПИ, т. 171, изд. ТГУ, 1967.
  18. М. С. Ройтман. Остроизбирательный широкодиапазонный фазовый детектор на фотоэлектрических преобразователях. Автоматика и телемеханика № 5, 1967.
  19. М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист, Ю. М. Фомичев. Источник стабильного и калиброванного переменного напряжения. Автометрия № 3, 1967.
  20. М. С. Ройтман, Ю. М. Фомичев, Э. И. Цимбалист. Образцовый источник переменных напряжений ГК-4. Изв. ТПИ, т. 171, Изд. ТГУ, 1968.
  21. М. С. Ройтман, Ю. М. Фомичев, Э. И. Цимбалист. Источники калиброванного переменного напряжения. Труды юбилейной научной конференции по радиотехническим измерениям (1967 г.) в печати.
-