

Для уменьшения времени переключения применяют нелинейный диодный шунт D_1, D_2 , который при перегрузках шунтирует резистор R_n , тем самым резко увеличивая ток перезаряда емкости интегратора.

При выборе частоты модуляции F_m следует иметь в виду, что чем выше частота модуляции, тем больше дрейф, уровень помех, начальные токи и напряжение модулятора, вызванные выбросами переходных процессов в ключах, так как с повышением F_m увеличивается количество выбросов в единицу времени. Как правило, выбирают

$$F_m = 10^4 \div 10^5 f_v,$$

где $f_v = \frac{1}{2\pi R_n C (K_n + 1)}$ — верхняя частота УПТ без обратной связи по уровню 3 дБ.

Для ослабления помех модулятора необходимо также использовать ключ с малыми паразитными емкостями и верно выбрать верхнюю частоту полосы пропускания УНЧ.

В соответствии с изложенными рекомендациями был разработан УПТ, примененный в качестве входного в цифровом мультиметре.

Преобразователь аналог — время. Разработанный измерительный прибор обладает высокой разрешающей способностью (1 мкс и 0,1 нс) и рассчитан для работы в лабораторных и заводских условиях. Он основан на использовании время-импульсного преобразования с двухтактным интегрированием. Для постоянного напряжения оптимальным линейным фильтром является звено с передаточной характеристикой

$$K(j\omega) = \frac{A}{j\omega} [5 - 7].$$

В рассматриваемом приборе имеются два счетчика: счетчик-синхронизатор и счетчик-индикатор. Это дает возможность ввести режим суммирования и усреднения результатов десяти измерений и режим частотомера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Larry Naquire. New Chopper-Amp Design Meets Stringent Noise, Orift, Setting-Time Specs.— EDN, 1969, № 2.
2. Л. Д. Гик, А. Г. Козачок, В. М. Кунов, Ю. А. Щепеткин. Анализ порога чувствительности измерительных усилителей.— Автометрия, 1967, № 6.
3. Ч. Беклейн. Оценка погрешности операционных усилителей.— Экспресс-информация, КИТ, 1967, вып. 45.

Поступило в редакцию
2 сентября 1969 г.

УДК 681.4.022.1.089.6

С. А. АНДРУСЯК,
В. Г. БОЙЧУК, В. А. КОЧАН, С. Г. СУСУЛОВСКИЙ
(Львов)

СТУПЕНЧАТЫЙ ПОТЕНЦИОМЕТР И ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПОВЕРКИ ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Для поверки цифровых вольтметров используются потенциометры и делители напряжения постоянного тока. Наиболее точными из выпускаемых в СССР являются потенциометры типа Р345 кл. 0,001 и делители напряжения типа Р313 того же класса. Однако контроль рабочего тока и особенно его самонастройка снижают производительность измерений. Дискретность компенсации температурной зависимости напряжения нормального элемента в этом потенциометре равна его классу, что не позволяет эффективно использовать нормальный элемент высокой точности. К тому же в условиях производства при массовых поверках цифровых вольтметров (ЦВ) более целесообразно использовать метод, когда о погрешностях ЦВ судят по разности между его показанием и значением поданного на вход калиброванного напряжения. Калибровку напряжения проще всего выполнить по показаниям одной декады потенциометра, кратным

значениям 1, 2, 3, ..., 10 в. Выходное сопротивление делителя напряжения (ДН) для обеспечения высокой чувствительности желательно иметь на порядок ниже, чем в делителе типа Р313.

С целью упрощения поверки ЦВ авторами разработан и испытан ступенчатый потенциометр (СП) и ДН, подстройка которых занимает не более 15 мин, т. е. время, необходимое для установления постоянной температуры в электронных приборах после включения их в сеть. СП имеет только один контур рабочего тока вместо трех, как в потенциометрах типа Р345, поэтому контроль рабочего тока осуществляется в три раза быстрее.

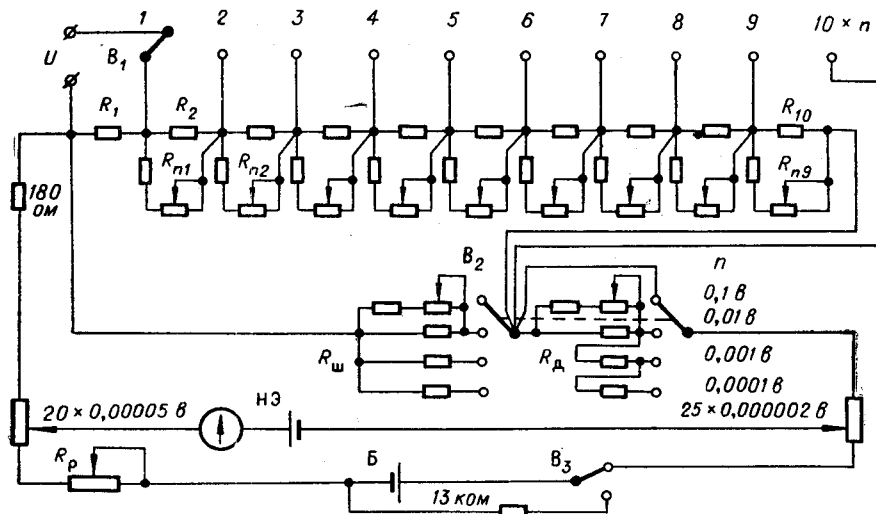


Рис. 1.

СП и ДН выполнены конструктивно в одном приборе, где осуществлена защита от влияния токов утечки на результат измерения [1], позволяющая с помощью одинарного моста постоянного тока кл. 0,05, например типа МО-61, произвести поверку и настройку этих приборов с высокой точностью.

Измерительная декада СП (рис. 1) состоит из 10 резисторов $R_1 - R_{10}$ с сопротивлением по 1000 ом. Подстройка показаний декады осуществляется шунтированием каждого из 9 резисторов потенциометрами $R_{n1} - R_{n9}$ типа ПТП201 по значению сопротивления первого резистора R_1 , являющегося «базовым». Поэтому погрешность сравнения сопротивлений зависит только от дискретности подстройки $\delta_{д.п}$ и погрешности отсчета δ_0 , которые в нашем случае не превышают $\delta_{д.п} = \pm 0,0001\%$ и $\delta_0 = \pm 0,0001\%$. Рабочий ток потенциометра равен 0,1 ма, а напряжение одной ступени 0,1 в. Пределы измерения СП $\times 0,01$ в, $\times 0,001$ в и $\times 0,0001$ в получаются при включении переключателем В добавочных и шунтирующих сопротивлений $R_д$ и $R_ш$, которые подстраиваются аналогично сопротивлениям измерительной декады, обеспечивая при этом погрешность δ_n перехода с предела на предел $\pm 0,0008$, $\pm 0,01$ и $\pm 0,05\%$ соответственно. Для установки рабочего тока СП по нормальному элементу предусмотрена постоянная часть установочного сопротивления 180 ом, погрешность сравнения которого по суммарному сопротивлению измерительной декады с учетом их нестабильности во времени не превышает $\delta_v = \pm 0,0003\%$.

Основные резисторы СП и ДН с целью уменьшения погрешности от изменения окружающей температуры изготавливаются из марганцевого провода одной бухты с температурным коэффициентом $\alpha = \pm (0,1 - 0,5) \cdot 10^{-5} 1^\circ \text{C}$. Дискретность компенсации температурной зависимости нормального элемента (переключатели $20 \times 0,00005$ в и $25 \times 0,000002$ в) $\delta_{д.к} = \pm 0,0002\%$. Для уменьшения колебания рабочего тока на время поверки и подстройки СП батарея В переключателем В переключается на сопротивление 13 ком. В качестве источника В выбрана батарея типа 1,3НВМЦ-500. Регулировка рабочего тока осуществляется с помощью магазина плеча сравнения того же моста типа МО-61 с дискретностью $\delta_{д.р} = \pm 0,0001\%$. Влияние контактных и термо-э. д. с. на результат измерения уменьшается изменением направления рабочего тока переключателем типа П309.

Предельная погрешность показаний каждой ступени СП на пределе 0,1 в описывается выражением

$$\delta_c = 2 \delta_0 + 0,5 \delta_{д.п} + \delta_y + 0,5 \delta_{д.к} + 0,5 \delta_{д.р} = \pm 0,0005\%, \quad (1)$$

где δ_0 — погрешность отсчета; $\delta_{д.п}$ — дискретность подстройки резисторов; δ_y — погрешность установочного сопротивления; $\delta_{д.к}$ — дискретность компенсации температурной зависимости напряжения нормального элемента; $\delta_{д.р}$ — дискретность регулировки рабочего тока.

На пределах $\times 0,01$ в, $\times 0,001$ в и $\times 0,0001$ в выражение (1) дополняется погрешностью $\delta_{п}$, поэтому на этих пределах δ_c равна $\pm 0,0013\%$, $\pm 0,01\%$ и $\pm 0,05\%$ соответственно.

Полное сопротивление ДН порядка 1 Мом, выходное — постоянно и равно 1 ком, а входное принимает значения 1, 10, 100 ком и 1 Мом соответственно коэффициентам деления 1, 10, 100 и 1000. Защита сопротивлений ДН от перегрузок в случае ошибочного включения напряжения осуществляется с помощью реле Р, порог срабатывания которого подбирается таким, чтобы входное напряжение отключалось, превысив номинальное в два раза.

Подстройка коэффициентов ДН осуществляется сравнением сопротивлений $R_1=R_2=R_3=3$ ком, $R_4=R_5=R_6=30$ ком и $R_7=R_8=R_9=300$ ком, соединяемых при подстройке в параллель штепсельными переключателями B_1 и B_2 (B_3 и B_4 или B_5 и B_6 соответственно) с базовым сопротивлением $R=1$ ком в соответствии с [2] и шунтированием одного из трех сопротивлений потенциометрами $R_{п1}$, $R_{п2}$ и $R_{п3}$ типа ПТП201 (рис. 2).

Учитывая, что относительная погрешность последовательного и параллельного соединения нескольких сопротивлений одного номинала приблизительно одинакова [2], можно записать

$$R_{пар} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} = R \frac{R'_{пар}}{R'}, \quad (2)$$

где $R'_{пар}$ — показание моста при измерении параллельного соединения сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 ; R' — показание моста при измерении базового сопротивления R . С учетом (2)

$$R_{нос} = R_1 + R_2 + R_3 = 9 R_{пар} = 9 R \left(1 - \frac{R'_{пар} - R'}{R'} \right). \quad (3)$$

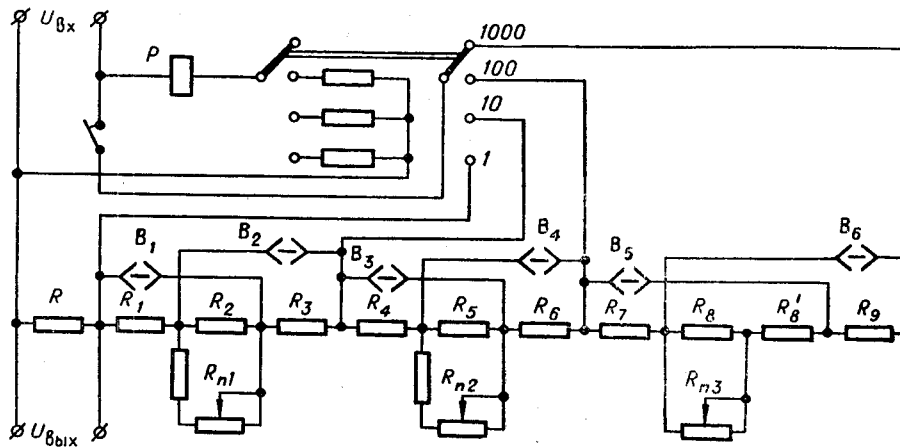


Рис. 2.

Тогда

$$\sum_{i=0}^3 R_i = R + R_1 + R_2 + R_3 = 10 R \left(1 + 0,9 \frac{R'_{пар} - R'}{R'} \right). \quad (4)$$

Действительное значение коэффициента деления 10 с учетом (4) составляет

$$K_{10} = \frac{\sum_{i=0}^3 R_i}{R} = 10 \left(1 + 0,9 \frac{R'_{\text{пар}} - R'}{R'} \right), \quad (5)$$

а относительная погрешность этого же коэффициента

В нашем случае $\delta_{R'}$, $\delta_{R''}$ и $\delta_{R''}$ зависят от погрешности отсчета, которая при использовании микровольтаноамперметра типа Р325 в качестве указателя равновесия не превышает в худшем случае $\delta_0 = \pm 0,00002\%$, и от дискретности подстройки $\delta_{\text{д.п}} = \pm 0,0001$, т. е.

$$\delta_{R'} = \delta_{R''} = \delta_{R''} = 2\delta_0 + 0,5\delta_{\text{д.п}} = 2 \cdot 0,00002 + 0,5 \cdot 0,0001 = \pm 0,00009\%. \quad (9)$$

Поэтому $\delta_{K_{10}} = \pm 0,00008\%$, $\delta_{K_{100}} = \pm 0,00016\%$, $\delta_{K_{1000}} = \pm 0,00024\%$.

Таким образом, с учетом (6)—(8) и конструктивных особенностей исполнений предельная погрешность подстройки коэффициентов ДН будет состоять из следующих составляющих:

$$\delta = \delta_K + \delta_{\text{п.с}} + \delta_M, \quad (10)$$

где $\delta_{\text{п.с}}$ — погрешность от коммутации штепсельными переключателями B_1 и B_2 (B_3 и B_4 , B_5 и B_6) при переходе от параллельного соединения трех сопротивлений к последовательному во время подстройки, которая не превышает $\pm 0,0001$, $\pm 0,00001$ и $\pm 0,000001\%$ для коэффициентов 10, 100 и 1000 соответственно; δ_M — методическая погрешность перехода от параллельного соединения трех сопротивлений к последовательному при подстройке, которая находится из следующих соображений.

Значение сопротивления последовательного соединения трех резисторов можно определить как

$$R_{\text{пос}} = R_1 + R_2 + R_3 = 3R(1 - \delta_1) + 3R(1 - \delta_2) + 3R(1 - \delta_3) \quad (11)$$

или после преобразования

$$R_{\text{пос}} = 9R \left(1 - \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{3} \right). \quad (12)$$

Значение эквивалентного сопротивления при параллельном соединении этих же резисторов

$$R_{\text{пар}} = \frac{27R^3(1 - \delta_1)(1 - \delta_2)(1 - \delta_3)}{9R^2[(1 - \delta_1)(1 - \delta_2) + (1 - \delta_2)(1 - \delta_3) + (1 - \delta_1)(1 - \delta_3)]}. \quad (13)$$

Пренебрегая величинами третьего порядка малости, имеем

$$R_{\text{пар}} = R \frac{1 - (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) + (\delta_1\delta_2 + \delta_2\delta_3 + \delta_1\delta_3)}{1 - \frac{2}{3}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) + \frac{1}{3}(\delta_1\delta_2 + \delta_2\delta_3 + \delta_3\delta_1)}. \quad (14)$$

Используя свойство сходимости степенного ряда $1 + X + X^2 + X^3 + \dots + X^n + \dots$ при $|X| < 1$, сумма которого в области сходимости равна $\frac{1}{1 - X}$, а также пренебрегая величинами третьего (и выше) порядка малости, после некоторых преобразований получим

$$R_{\text{пар}} = R \left\{ 1 - \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{3} + \frac{2}{3}(\delta_1\delta_2 + \delta_2\delta_3 + \delta_1\delta_3) - \right. \\ \left. - \frac{2}{9}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)^2 + (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) \left[\frac{5}{9}(\delta_1\delta_2 + \delta_2\delta_3 + \delta_1\delta_3) - \frac{4}{9}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)^2 \right] \right\}. \quad (15)$$

Методическая погрешность перехода от последовательного соединения резисторов к параллельному определяется как

$$\delta_m = \delta_{\text{пос}} - \delta_{\text{пар}} = \frac{2}{3} (\delta_1 \delta_2 + \delta_2 \delta_3 + \delta_1 \delta_3) - \frac{2}{9} (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)^2 + (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) \times \left[\frac{5}{9} (\delta_1 \delta_2 + \delta_2 \delta_3 + \delta_1 \delta_3) - \frac{4}{9} (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)^2 \right]. \quad (16)$$

Так как подстройка сопротивлений трех резисторов по значению сопротивления базового резистора R производится путем изменения сопротивления резистора R_2 (R_5, R_8) до значения, когда погрешности δ_1 и δ_3 будут компенсированы погрешностью δ_2 , то

$$\delta_2 = -(\delta_1 + \delta_3). \quad (17)$$

На основании (16) и (17)

$$\delta_m = \frac{2}{3} (\delta_1 \delta_2 + \delta_2 \delta_3 + \delta_1 \delta_3). \quad (18)$$

При подгонке сопротивлений ДН с погрешностью $\pm 0,01\%$ и с учетом нестабильности их во времени порядка $\pm 0,005\%$ предельное значение составит $\delta_1 = \delta_3 = \pm 0,03\%$, а $\delta_2 = \pm 0,06\%$. Поэтому

$$\delta_m = \frac{2}{3} [0,0003 (-0,0006) + (-0,0006) 0,0003 + 0,0003 \cdot 0,0003] \cdot 100\% = \pm 0,000027\%.$$

Суммируя погрешности, входящие в (10), находим предельные значения погрешностей подстройки коэффициентов ДН: $\delta_{K_{10}} = \pm 0,00021\%$; $\delta_{K_{100}} = \pm 0,00020\%$; $\delta_{K_{1000}} = \pm 0,00027\%$.

Таким образом, описанные СП и ДН обеспечивают калибровку напряжений в точках, кратных 1, 2, 3, . . . , 10, с предельной погрешностью, не превышающей значений, приведенных в таблице.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. K r u k o w s k i. Die Genauigkeit der Gleichstromkompensationsmessungen und die Mittel zu ihrer Steigerung. Warschau, 1935.
2. С. А. Андрусак, В. А. Кочан, Д. Е. Марунчак, С. Г. Сусуловский. Методика подгонки сопротивлений делителя напряжения ДН-62, определение коэффициентов деления и их погрешностей.— Контрольно-измерительная техника (Львов), 1966, № 3.

Поступило в редакцию
1 апреля 1969 г.,
окончательный вариант —
1 октября 1969 г.