

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 681.2.089.6(083.76)

М. С. РОЙТМАН, Ю. М. ФОМИЧЕВ, Э. И. ЦИМБАЛИСТ

(Томск)

СТАБИЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК КАЛИБРОВАННОГО ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Разработка и внедрение новых электронных измерителей переменного напряжения повышенной точности, работающих в широком диапазоне частот, остро ставят вопрос об их поверке и создании комплекса необходимой поверочной аппаратуры. Используемая аппаратура (типа В1-2, В1-4 и др.), предназначенная для поверки калибровки электронных вольтметров, в ряде случаев уже исчерпала свои возможности и не обеспечивает необходимой точности.

При создании новой поверочной аппаратуры необходимо решить следующие задачи: 1) повысить точность измерения переменного напряжения в звуковом и ультразвуковом диапазоне частот [до $(1-5) \cdot 10^{-4}$]; 2) разработать амплитудно-стабильные генераторы с кратковременной нестабильностью около $\pm 0,01\%$ за 1—3 мин и разрешающей способностью установки выходного напряжения около $0,01\%$; 3) снизить коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения генератора ($K_{\text{нл}} \leq 0,05\%$ в среднем интервале диапазона частот). Описываемый в настоящей работе образцовый источник переменного напряжения в значительной степени удовлетворяет поставленным задачам.

Известно, что наиболее высокая точность получения синусоидального напряжения, калиброванного по действующему значению, достигается при использовании компараторов, т. е. устройств, сравнивающих переменное напряжение с эталонным постоянным. Такое сравнение двух напряжений невозможно без достижения их высокой стабильности во времени. Обычно задачи получения стабильного выходного напряжения источника и его калибровка разделяются, т. е. в генераторе используются различные варианты схемных решений по повышению стабильности выходного напряжения [1—3], а затем с помощью компаратора выполняется сравнение этого напряжения с эталонным постоянным [4]. Однако можно разработать генератор, в котором функции стабилизации и калибровки напряжения совмещаются при помощи высококачественного дифференциального компаратора. Функциональная схема такого генератора-калибратора приведена на рис. 1 (ОИН — образцовый источник напряжения; ДК — дифференциальный компаратор; Д — делитель; М — мультивибратор), а его принципиальная схема — на рис. 2. Использование термоэлектрических преобразователей в системах с такой автоматической стабилизацией нежелательно из-за ряда недостат-

ков, основными из которых являются низкая чувствительность и сильная зависимость термо-э.д.с. от температуры окружающей среды. Анализ возможных элементов, пригодных для компарирования, показал, что в данном случае целесообразно использовать фотоэлектрические преобразователи [5]. Для уменьшения коэффициента нелинейных

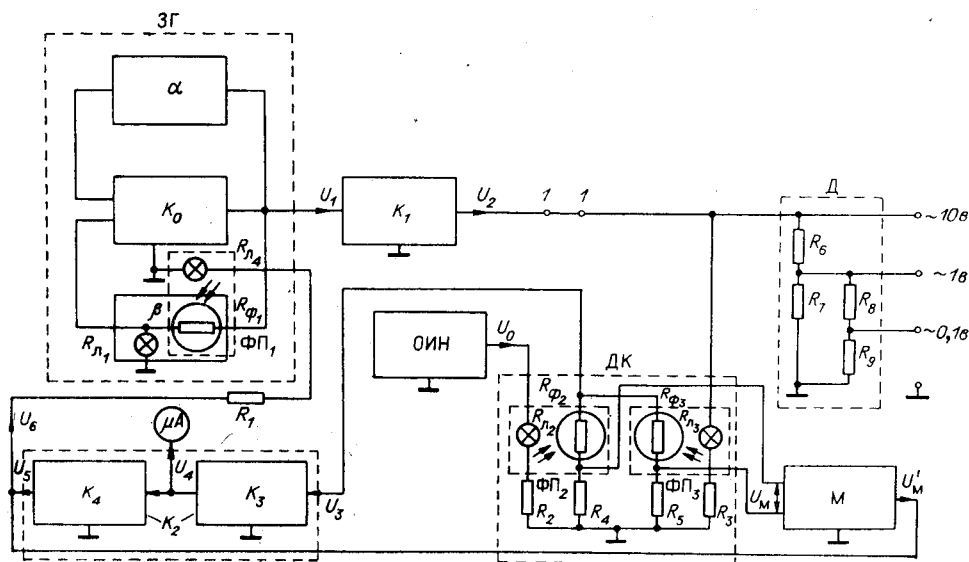


Рис. 1.

искажений выходного напряжения инерционно-нелинейный элемент задающего генератора включается в катод первой лампы через разделительный конденсатор; усилитель K_2 выполняется избирательным, а его выходной каскад собирается по схеме сложного катодного повторителя, обеспечивающего передачу сигнала с малыми нелинейными искажениями.

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для оценки величины нестабильности выходного напряжения генератора рассмотрим его развернутую функциональную схему (см. рис. 1). Суммарная нестабильность напряжения U_2 равна

$$\frac{\Delta U_2}{U_2} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\gamma_i} \left(\frac{\Delta H}{H} \right)_i,$$

где γ_i — коэффициенты амплитудной стабилизации, показывающие, во сколько раз относительные изменения амплитуды стабилизируемого напряжения меньше, чем вызывающие их относительные нестабильности; $\left(\frac{\Delta H}{H} \right)_i$ — относительные нестабильности узлов и элементов схемы.

Определим значения коэффициентов стабилизации напряжения U_2 , первоначально разомкнув систему автоматического регулирования в точках 1—1 и задавшись произвольным значением $\frac{dU_2}{U_2}$ на входе фото-

электрического преобразователя ($\Phi\Pi_3$), включенного в цепь переменного тока. Тогда, обходя систему по контуру, получим:

$$\frac{d U_6}{U_6} = \frac{U_M}{U_6} d_3 K_2 \frac{d R_{\Phi_3}}{R_{\Phi_3}}; \quad (3)$$

$$\frac{d R_{\Phi_1}}{R_{\Phi_1}} = - \frac{d_4}{d_5} K_{l_1} \frac{d U_6}{U_6}; \quad (4)$$

$$\frac{d K_0}{K_0} = \beta (1 - \beta) K_0 \left(\frac{d R_{л_1}}{R_{л_1}} + \frac{d R_{\Phi_1}}{R_{\Phi_1}} \right); \quad (5)$$

$$\frac{d U_1}{U_1} = d_6 \frac{d R_{л_1}}{R_{л_1}}; \quad (6)$$

$$\frac{d U_1}{U_1} = \frac{d U_2}{U_2} = d_6 \left(\frac{9}{2K_0} \frac{d K_0}{K_0} - \frac{d R_{\Phi_1}}{R_{\Phi_1}} \right) = - d_6 \frac{d R_{\Phi_1}}{R_{\Phi_1}} \quad (\text{при } \frac{d K_0}{K_0} = 0). \quad (7)$$

В выражениях (1)—(7) использованы следующие обозначения:

K_{i_1}, K_{i_2} — относительные коэффициенты передачи по току $\Phi\Pi_1$ и $\Phi\Pi_3$ соответственно;

$$d_1 = 1 + \frac{R_3}{R_{л_3}}; \quad d_2 = n_3 + \frac{R_3}{R_{л_3}}; \quad d_3 = \frac{R_{\Phi_2} R_{\Phi_3}}{(R_{\Phi_2} + R_{\Phi_3})^2};$$

$$d_4 = 1 + \frac{R_1}{R_{л_1}}; \quad d_5 = n_4 + \frac{R_1}{R_{л_1}}; \quad d_6 = \frac{1}{n_1 - 1} + \frac{1}{1 + \frac{R_{\Phi_1}}{R_{л_1}}};$$

$d_1 - d_6$ — постоянные коэффициенты, характеризующие режимы работы $\Phi\Pi$;

$R_{л_1}, R_{л_3}, R_{л_4}$ — статические сопротивления ламп $\Phi\Pi$ в рабочей точке;

n_1, n_3, n_4 — постоянные коэффициенты, характеризующие степень нелинейности характеристик ламп $\Phi\Pi$;

$K_0 = \frac{3}{1 - \frac{3R_{л_1}}{R_{л_1} + R_{\Phi_1}}}$ — коэффициент передачи усилителя RC -генератора с мостом Вина.

Совместное решение (1)—(7) позволяет получить коэффициент амплитудной стабилизации системы

$$\eta_{ст} = \frac{d U_1 / U_1}{d U_2 / U_2} = \frac{U_M}{U_6} \frac{d_1 d_3 d_4 d_6 K_{l_1} K_{l_2} K_2}{d_2 d_5}. \quad (8)$$

Элементы и узлы схемы, вызывающие нестабильность U_2	Коэффициенты амплитудной стабилизации η_i : $d_1 = d_4 = d_7 = d_9 = 3; \frac{U_M}{U_6} \approx 1; d_2 = d_5 = d_8 = 4;$ $d_3 = \frac{1}{4}; d_6 = \frac{4}{3}; n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 2; K_2 = 20;$ $k_{i_1} = k_{i_2} = k_{i_3} = 5.$
Лампа накаливания $\Phi\Pi_2$ и $\Phi\Pi_3$ дифференциального компаратора	$\eta_1 = \frac{d_1^2}{d_2} = \frac{9}{4};$ $\eta_2 = -\frac{d_1^2}{d_2} = -\frac{9}{4}.$
Фотосопротивления $\Phi\Pi_2$ и $\Phi\Pi_3$ дифференциального компаратора	$\eta_3 = \pm \frac{d_1}{d_2} K_{i_3} = \pm \frac{15}{4}.$
Источник опорного напряжения	$\eta_4 = \pm \frac{d_1 d_8 K_{i_3}}{d_2 d_7 K_{i_2}} = \pm 1.$
Источник питания моста дифференциального компаратора	$\eta_5 = \frac{U_M}{U_3} \frac{d_1 d_3 K_{i_3}}{d_2} \approx \frac{U_M}{U_3}.$
Усилитель сигналов рассогласования	$\eta_6 = \eta_5 = \frac{U_M}{U_3}.$
Источник напряжения	$\eta_7 = \frac{d_5 \eta_{ст}}{d_4 d_6 K_{i_1}} \approx \frac{75}{4}.$
Лампа накаливания $\Phi\Pi_1$	$\eta_8 = \frac{-d_9 \eta_{ст}}{d_6 K_{i_1}} \approx -42.$
Фотосопротивление R_{Φ_1} , инерционно-линейный элемент $R_{\lambda_1} \text{ЗГ}$	$\eta_9 = -\eta_{10} = \frac{\eta_{ст}}{d_6} \approx 70.$
Усилитель ЗГ	$\eta_{11} = \frac{2K_0 \eta_{ст}}{9d_6} \approx 15K_0.$
Усилитель мощности	$\eta_{12} = \eta_{ст} \approx 94.$

Используя выражения (1) — (7) или аналогичные им совместно с (8), определим коэффициенты амплитудной стабилизации (см. таблицу). Анализ коэффициентов стабилизации показывает, что основная нестабильность выходного напряжения будет складываться из следующих составляющих:

$$\frac{d U_2}{U_2} = \frac{1}{\eta_1} \left(\frac{d R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_2}} - \frac{d R_{\lambda_3}}{R_{\lambda_3}} \right) + \frac{1}{\eta_3} \left(\frac{d R_{\Phi_3}}{R_{\Phi_3}} - \frac{d R_{\Phi_2}}{R_{\Phi_2}} \right) + \frac{d U_0}{U_0}.$$

Уменьшение нестабильности достигается путем подбора предварительно тренированных ламп накаливания и фотосопротивлений, имеющих одинаковый дрейф, а также благодаря применению в опор-

ном источнике кремниевого стабилитрона с ТКН= 10^{-3} %/град. Указанные меры позволяют получить кратковременную нестабильность напряжения U_2 порядка (0,01—0,02%) за 5—10 мин.

ПОГРЕШНОСТЬ УСТАНОВКИ НОМИНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Если компарирование, осуществляемое дифференциальным компаратором, выполняется без погрешностей, то выходное напряжение генератора U_2 равно напряжению образцового источника U_0 . Погрешность установки величины переменного напряжения с помощью компаратора можно представить выражением

$$\gamma_u = \gamma_{0u} + \gamma_{fu} + \gamma_a$$

где γ_{0u} — погрешность измерения постоянного напряжения, обусловленная погрешностью компенсатора менее 0,01%; γ_{fu} — частотная погрешность компарирования; γ_a — погрешность перехода из-за асимметрии.

Снижение точности может возникнуть также и за счет нечувствительности нулевого указателя компаратора, нестабильности элементов компаратора и др. Причины появления частотной погрешности различны: на низких частотах они вызываются конечной величиной инерционности преобразователя [5], а на высоких обуславливаются реактивностью элементов компаратора. Величина частотной погрешности генератора без учета погрешности за счет поверхностного эффекта (диаметр нити лампы менее 5 мк, диаметр провода добавочного сопротивления R_3 равен 20 мк; величиной этой погрешности на частотах $f \leq 100$ кГц можно пренебречь) определяется выражением

$$\gamma_{fu} = 1 - \frac{U_2}{U_0} = 1 - \frac{Z'_l (1 + Z_3 / Z_l)}{R_3 + R_{л_3}}, \quad (9)$$

где Z'_l — сопротивление нити переменному току без учета шунтирующих емкостей; Z_3 — модуль добавочного сопротивления в цепи лампы с учетом шунтирующей емкости, определяемой суммой паразитных емкостей относительно «земли»; Z_l — полное сопротивление нити лампы с учетом паразитных емкостей, шунтирующих нить; R_3 — величина добавочного сопротивления на постоянном токе; $R_{л_3}$ — сопротивление нити лампы постоянному току. В пределе, когда ФП работают без добавочного сопротивления в цепи лампы $R_3 = 0$, верхнюю рабочую частоту преобразователя при допустимых частотных искажениях можно определить из (9):

$$\omega_B \approx \frac{R_{л_3}}{L} \sqrt{2 (\gamma_{fu})_{\text{доп}}}$$

где L — индуктивность нити лампы, которая подсчитывается по конструктивным данным лампы.

Величину погрешности из-за асимметрии теоретически оценить трудно, однако экспериментально определено, что эта погрешность может быть меньше 0,01%.

Для получения высокой точности установки выходного напряжения в генераторе предусмотрена калибровка компаратора по постоянному то-

ку с помощью переключателя Π_2 (см. рис. 2). При положении переключателя «Установка 0» с ОИН подается напряжение на обе лампы (ЛН₅ и ЛН₆) компаратора и сопротивлениями R_{102} и R_{105} производится баланс моста. Этим исключается влияние долговременной нестабильности элементов компаратора. Положение переключателя Π_2 «Выход» является рабочим; при этом $U_2 = U_0$, если при помощи R_{39} и R_{43} стрелка нулевого указателя установлена на 0. Необходимо отметить, что переключение частоты в рабочем положении переключателя Π_2 вызывает кратковременное появление больших выбросов напряжения на выходе генератора, что может привести к перегоранию лампы ЛН₅ компаратора. Для защиты компаратора и нелинейно-инерционного элемента задающего генератора служат C_{31} , D_1 , D_2 , а также специальное устройство, сопряженное с переключателями частоты. При переключении частоты срабатывают концевые выключатели Π_4 и Π_5 , которые разрывают на время переключения цепи лампы ЛН₅ компаратора и ламп ЛН₁, ЛН₂, ЛН₃ в задающем генераторе. Указанными мерами резко повышается надежность работы генератора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ГЕНЕРАТОРА-КАЛИБРАТОРА ГК-3 № 2

Генератор имеет 12 фиксированных частотных точек: 20, 55, 100, 400 *гц*; 1, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 *кгц*.

Коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения генератора в диапазоне частот 50 *гц* — 20 *кгц* лежит в пределах (0,04—0,07) %.

Проверка показаний ГК-3 № 2 с помощью вольтметра фирмы «Muirhead», имеющего погрешность $\pm 0,05\%$ на частотах до 5 *кгц*, показала, что напряжение 1 и 0,1 *в* устанавливается с погрешностью, не превышающей класса вольтметра в диапазоне частот до 10 *кгц*.

Аттестация генератора-калибратора ГК-3 № 2 (рис. 3), проведенная по образцовым приборам ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, дала следующие результаты:

1) нестабильность постоянного напряжения 9,2840 *в* опорного источника генератора менее 0,01% за сутки и не более $\pm 0,02\%$ за трое суток;

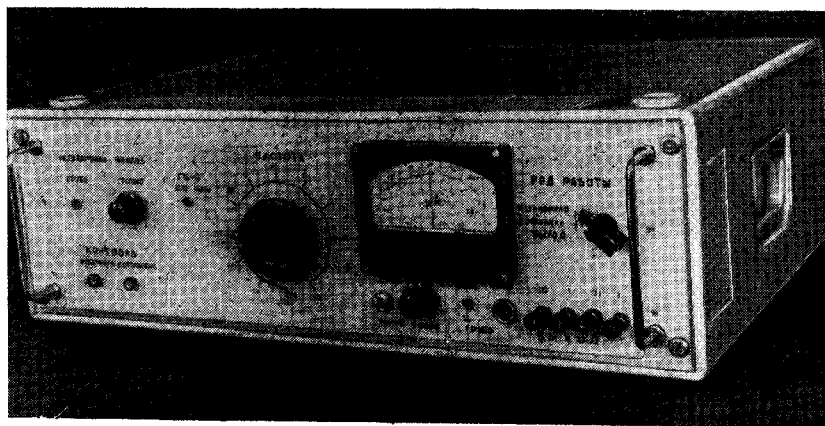


Рис. 3.

2) нестабильность переменного напряжения генератора при нагрузке его током 10 ма в диапазоне частот 50 гц — 100 кгц менее $\pm 0,01\%$ в мин и не более $+ (0,01—0,02)\%$ за 5—10 мин;

3) значение выходного напряжения генератора (на клеммах 10 в) отличается от значения напряжения опорного не более чем на $\pm 0,03\%$ в диапазоне частот 100 гц — 100 кгц и не менее чем $-0,12\%$ на частоте 50 гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. С. Ройтман, В. К. Жуков. Применение фотосопротивлений для стабилизации напряжений.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды II конференции). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
2. Новые научно-исследовательские работы по метрологии, № 4 (Электрические измерения). М., Изд-во стандартов, 1964.
3. А. А. Львович. Амплитудно-стабильные генераторы с АРУ.— Радиотехника, 1960, т. 15, № 4.
4. Т. Б. Рождественская. Электрические компараторы для точных измерений тока, напряжения и мощности. М., Изд-во стандартов, 1964.
5. Б. А. Перминов, М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист. Компаратор переменного тока на фотоэлектрических преобразователях.— Автометрия, 1965, № 5.

Поступила в редакцию
19 сентября 1966 г.