

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 621.317.326

Б. А. ПЕРМИНОВ, М. С. РОЙТМАН, Э. И. ЦИМБАЛИСТ

(Томск)

### КОМПАРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Дано описание компаратора, базирующегося на использовании индикатора напряжения на маломощной лампе накаливания и фотоспротивления. Рассмотрены погрешности компарирования; изложены результаты экспериментальной проверки.

Современная наука и техника предъявляют все более высокие требования к точности измерения физических величин, и в частности, переменных токов и напряжений. Эти требования явились одной из основных причин быстрого развития и расширяющегося применения высокоточных цифровых приборов. Естественно, что для поверки таких приборов нужна еще более точная, прецизионная аппаратура. Наиболее высокой точности поверки вольтметров переменного тока можно достигнуть благодаря использованию компараторов. В настоящее время в Советском Союзе [1] и за рубежом [2, 3] в качестве образцовых применяются компараторы переменного тока, элементом сравнения которых является термопреобразователь. В [3] сообщается о разработке термоэлектрического компаратора с погрешностью 0,01% в частотном диапазоне от 10—100 гц до 30 кгц. Однако получение столь высокой точности связано с большими трудностями. Практически погрешность порядка 0,01—0,02% в широком частотном диапазоне является минимально возможной для компараторов с термопреобразователями существующих типов. Это обусловлено известными факторами, основными из которых являются:

1. *Крайне низкая чувствительность термопреобразователей.* Даже для лучших образцов многоэлементных термопреобразователей термо-э. д. с. при номинальном токе лежит в пределах десятков милливольт, что приводит к необходимости использования высокочувствительных указателей и принятия жестких мер по устранению возможных причин появления в цепях термо-э. д. с. контактов.

2. *Существенная зависимость термо-э. д. с. термопреобразователей от температуры окружающей среды.* Наибольшее изменение термо-э. д. с. наблюдается у вакуумных бесконтактных термопреобразователей. Например, у термопреобразователей типа ТВБ температурный коэффициент достигает —2,5% на 10°С, у воздушных бесконтактных термопреобразователей он несколько ниже и составляет около 1% на 10°С. Наблюдается также большой разброс значений температурного коэффициента у термопреобразователей одного и того же типа [4].

3. Наличие у термопреобразователей большой погрешности асимметрии (до 1%). В связи с этим применение термопреобразователей типа ТВБ связано с тщательной разбраковкой по этому параметру, а достижение малой погрешности (0,02% у ТЭМ-1) — с большими технологическими трудностями.

Указанные недостатки термопреобразователей особенно остро ощущаются при создании аппаратуры, предназначенной для работы не в лабораторных условиях.

Все сказанное и побуждает рассмотреть возможности использования для целей компарирования других элементов, в частности, маломощных ламп накаливания и фотоспротивлений. На целесообразность применения ламп накаливания для сравнения токов в электрических и радиотехнических измерениях неоднократно указывалось А. И. Фюрстенбергом, например, в [5]. Правда, сравнение токов проводилось путем визуального сопоставления яркостей в момент «зажигания» лампы, что имело определенные недостатки. Однако, несмотря на сравнительно большую погрешность определения момента «зажигания», равенство токов можно было установить с достаточно высокой точностью, благодаря резкой зависимости яркости нити  $B$  от силы тока  $I (B \approx kI^{100})$  вблизи порога «зажигания». Созданные ранее компараторы, в которых световые потоки ламп воспринимались фотоэлементами или фотоспротивлениями [1, 6], не получили широкого распространения, так как до недавнего времени не было стабильных, виброустойчивых и с малой потребляемой мощностью ламп накаливания, а также достаточно качественных для метрологических целей фотоспротивлений. Создание лампы накаливания, НСМ9×60, а также фотоспротивлений СФ2-2 и СФ3-2 позволило вновь вернуться к рассмотрению возможностей использования фотоэлектрических преобразователей (ФП) для компарирования токов и напряжений.

Проведенные исследования всецело подтвердили такую возможность. Ниже дается описание компаратора, основанного на использовании индикатора напряжения на маломощной лампе накаливания и фотоспротивлениях [7]. Компаратор предназначен для поверки цифровых вольтметров типа В7-8. Для калибровки указанных вольтметров необходимо иметь напряжение 10 в (действующее значение) с погрешностью  $\pm 0,05\%$  в частотном диапазоне от 20 гц до 100 кгц.

### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОПИСАНИЕ КОМПАРАТОРА

В основу компарирования положен метод одновременного сравнения влияния светового потока лампы накаливания на фотоспротивление (ФС) при чередовании сигналов постоянного и переменного токов. В этом случае равенству величин действующего значения переменного  $I_{\sim}$  и постоянного  $I_0$  токов соответствует равенство световых потоков  $F$  и сопротивлений  $R_{\sim}$  и  $R_0$ , т. е. если

$$I_{\sim} = I_0, \text{ то } F_{\sim} = F_0 \text{ и } R_{\sim} = R_0.$$

Указанные равенства фиксируются с помощью измерительного прибора, шкала которого градуируется непосредственно в отклонениях измеряемой величины. Принципиальная схема компаратора приведена на рис. 1. Внешний вид прибора представлен на рис. 2. В качестве элементов ФП используется пленочное сернисто-кадмиевое фотоспротивление СФ2-2 ( $R_{\sim}$ ) в сочетании с маломощной лампой накаливания

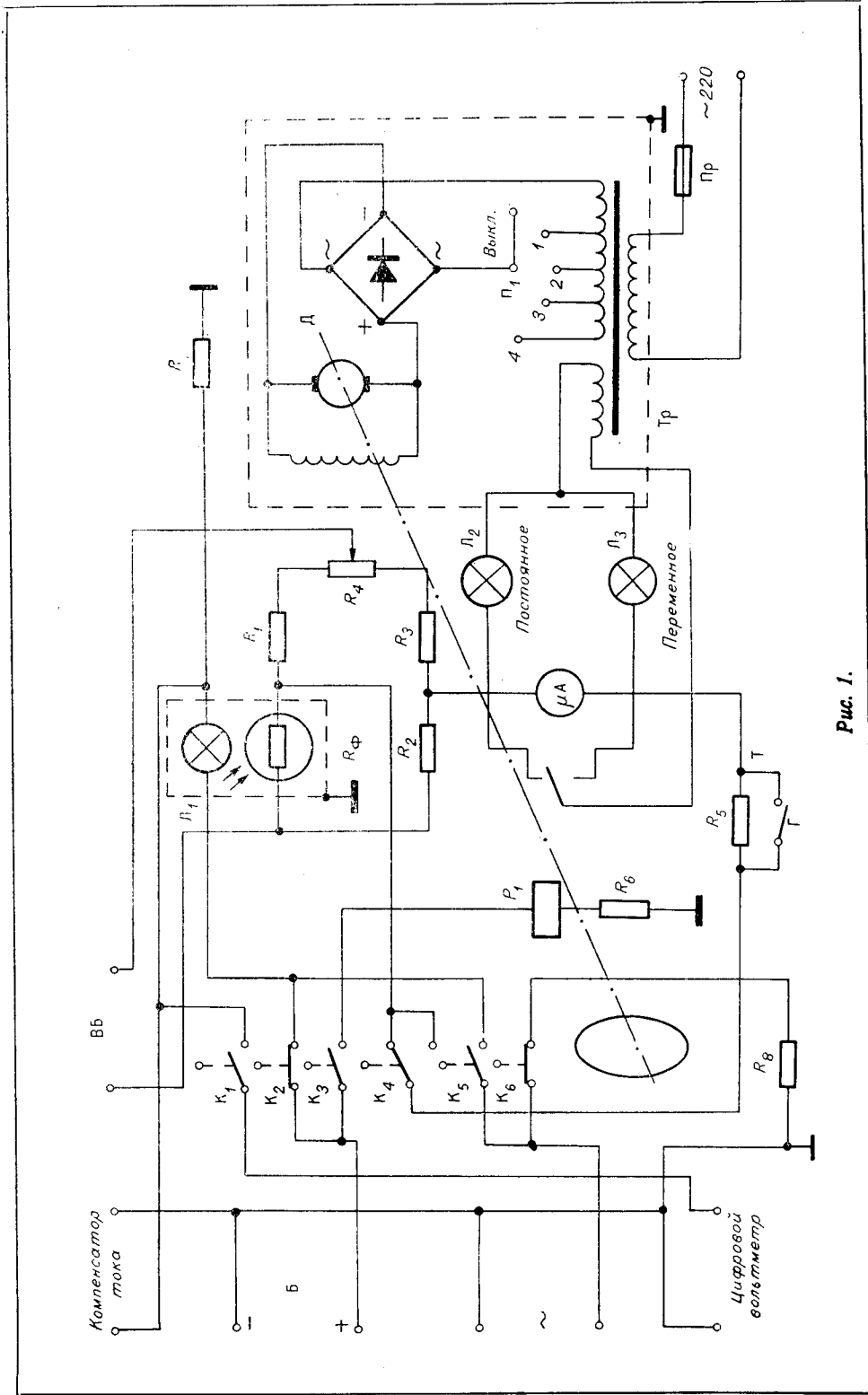


Рис. 1.

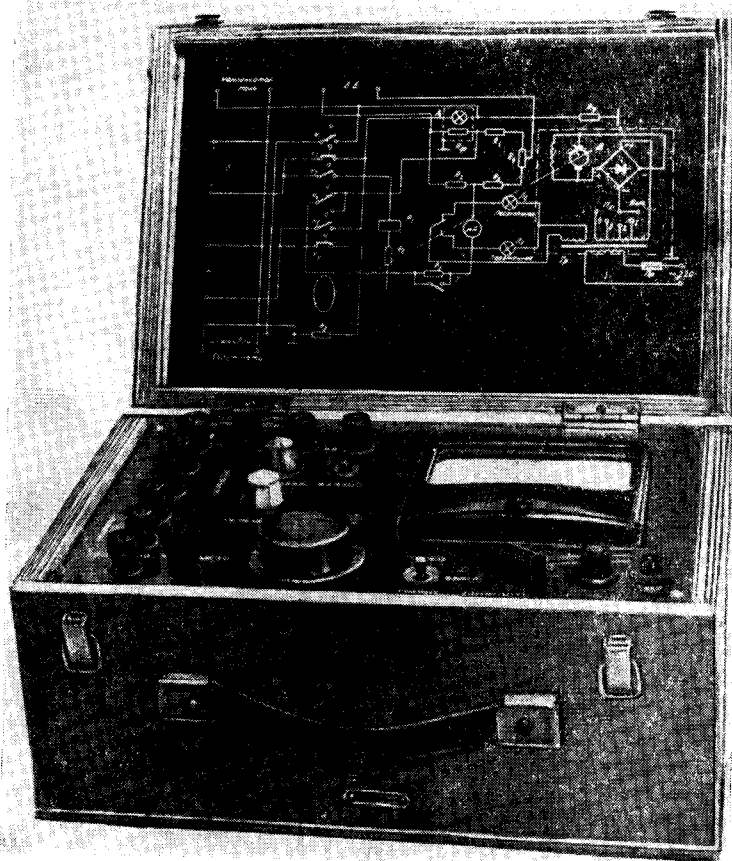


Рис. 2.

типа НСМ9  $6 \times 60$  ма ( $L_1$ ). Значение рабочего тока компарирования и соответственно сопротивления плеч моста  $R_1—R_4$  выбирается исходя из ом-амперной статической характеристики преобразователя (рис. 3). В целях уменьшения нестабильности сопротивления лампы во времени величина тока выбирается значительно ниже номинальной; практически для лампы типа НСМ9  $\times 60$  эта величина может быть доведена до 20—25 ма. В этом случае (см. рис. 3), помимо снижения потребляемой мощности, повышается чувствительность элемента сравнения\*, а также увеличивается постоянная времени. В компараторе описываемого варианта значение рабочего тока, необходимое для установки напряжения 10 в на сопротивлении  $R_7$ , составляет 25 ма. Коммутация ФП, а также других элементов компаратора на постоянный и переменный токи осуществляется с помощью контактов кулачкового переключателя. Период коммутации регулируется переключателем  $\Pi_1$ .

Профили кулачков и положение их на оси подобраны таким образом, что контакты  $K_1$  и  $K_4$ , включающие цепь цифрового вольтметра

\* Под относительной чувствительностью элемента сравнения по току  $K_i$  мы понимаем отношение относительного изменения сопротивления  $R_\phi$  к относительному изменению тока  $I$ , т. е.

$$K_i = \frac{\Delta R_\phi / R_\phi}{\Delta I / I}.$$

и индикаторного прибора, срабатывают с некоторым запозданием относительно времени включения контактов  $K_2$  и  $K_5$ . Это сделано для того, чтобы «вырезать» переходный процесс при переключениях на постоянный и переменный токи. Кроме  $K_4$ , в цепи микроамперметра установлено сопротивление  $R_5$  и тумблер «грубо» — «точно», с помощью которого можно изменять цену деления шкалы прибора в 10 раз.

Относительная чувствительность компаратора составляет одно деление на 0,01% изменения тока от номинального (в качестве указателя использован микроамперметр типа М109 со шкалой 5—0—5 мка,  $R_{пр} = 2,5$  ком). Дрейф нуля индикаторного прибора на постоянном токе после часового прогрева не превышает одного деления за время компарирования. Изменения чувствительности компаратора при длительной работе практически не обнаружено.

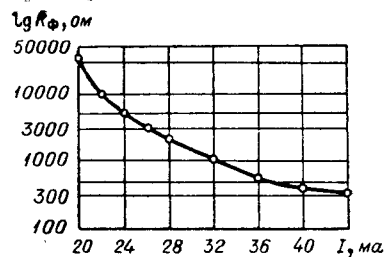


Рис. 3.

### ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

Погрешность установки величины переменного напряжения с помощью компаратора можно представить выражением

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

где  $\gamma_{0u}$  — погрешность измерения постоянного напряжения, обусловленная погрешностью компенсатора и нечувствительностью нулевого указателя компаратора;

$\gamma_{fu}$  — частотная погрешность компарирования;

$\gamma_a$  — погрешность асимметрии.

Снижение точности может возникнуть и за счет нестабильности элементов компаратора и др. Погрешность измерения постоянного напряжения с помощью компенсатора в основном зависит от используемой аппаратуры и, по данным [1], находится в пределах  $\pm 0,005\%$ . Погрешность измерения за счет нечувствительности нулевого указателя не более 0,005%.

### ЧАСТОТНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ КОМПАРИРОВАНИЯ

Причины появления частотной погрешности компарирования различны; на низких частотах они вызываются конечной величиной инерционности преобразователя, а на высоких — обуславливаются наличием реактивности элементов компаратора и подключенных приборов. В области высоких частот эквивалентная схема измерительного преобразователя и сопротивления  $R_7$  изображена на рис. 4. Величина частотной погрешности установки напряжения без учета погрешности за счет поверхностного эффекта\* может быть определена следующим выражением:

$$\gamma_{fu} = 1 - \frac{Z_H}{R_H} \frac{Z'_n}{Z_n}, \quad (1)$$

\* Диаметр нити лампы равен приблизительно 10 мк; величиной этой погрешности можно пренебречь.

где  $Z_n$  — полное сопротивление нагрузки с учетом шунтирующей емкости  $C_n$ , определяемой суммой паразитных емкостей относительно земли;  
 $R_n$  — сопротивление нагрузки на постоянном токе;  
 $Z_{л1}$  — полное сопротивление нити лампы с учетом паразитных емкостей  $C_{л1}$ ;  
 $Z'_{л1}$  — сопротивление нити без учета шунтирующих емкостей.  
 Если  $\omega L_n \ll R_n$ , выражение (1) упрощается:

$$\gamma_{fu} \approx 1 - \left| \frac{\left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_{0л1}} \right)^2 + j \omega R_{л1} C_{л1} \right]}{\left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_{0н}} \right)^2 + j \omega R_n C_n \right]} \right|,$$

где

$$\omega_{0л1}^2 = 1/L_{л1} C_{л1}; \quad \omega_{0н}^2 = 1/L_n C_n.$$

При

$$\frac{\omega}{\omega_{0л1}} \ll 1 \text{ и } \frac{\omega}{\omega_{0н}} \ll 1 \quad \gamma_{fu} = 0,$$

когда

$$R_{л1} C_{л1} = R_n C_n. \quad (2)$$

Практически из-за существенного разброса значений паразитных емкостей подключаемых приборов соотношение (2) не выполняется, вследствие чего возникает частотная погрешность. Наличие этой погрешности обуславливает также дополнительное снижение точности

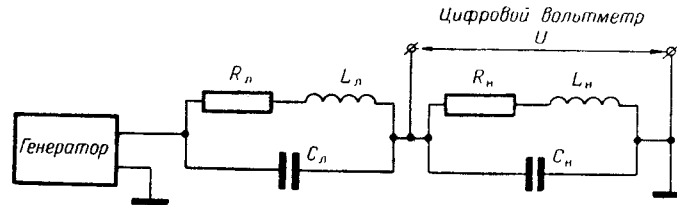


Рис. 4.

за счет гармонических составляющих в напряжении генератора. В общем виде эта погрешность может быть оценена с помощью соотношений, приведенных в [1]; однако при проверке цифровых вольтметров ограничения на допустимый коэффициент гармоник генератора налагаются самим вольтметром.

Для оценки величины погрешности в области нижних частот необходимо решить уравнение теплового состояния нити лампы. Полагая, что отвод тепла от нити через траверсы невелик (отношение длины нити к ее диаметру  $\frac{l}{d} \gg 1$ ), и пренебрегая потерями тепла за счет конвекции, получим уравнение теплового баланса

$$mc \frac{d(T - T_0)}{dt} + \pi b \sigma d (T^4 - T_0^4) = 0,24 i_m^2 \frac{\rho}{q} \sin^2 \Omega t, \quad (3)$$

где  $m$  — масса нити;  
 $c$  — удельная теплоемкость вольфрама;

$b$  — коэффициент неполноты излучения;  
 $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана;  
 $T$  и  $T_0$  — соответственно абсолютная температура нити и окружающей среды;  
 $i_m$  — амплитуда тока;  
 $\rho$  — удельное сопротивление материала;  
 $q$  — поперечное сечение.

Рабочая температура нити (в зависимости от режима) может находиться в пределах 700—1500°С, поэтому обычное предположение, что потери на излучение пропорциональны температуре нагрева, несправедливо. При малых амплитудах колебания температуры около среднего значения возможны упрощения:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{изл}} &= \pi b \sigma d (T^4 - T_0^4) \approx \pi b \sigma d T^4 = \pi b \sigma d [\Theta_{\text{ср}} + \Theta(t)]^4 \approx \\
 &\approx \pi b \sigma d [\Theta_{\text{ср}}^4 + 4\Theta_{\text{ср}}^3 \Theta(t)].
 \end{aligned} \quad (4)$$

Если записать (3) с учетом (4) и ввести новые обозначения, то

$$A \frac{d\Theta(t)}{dt} + B \Theta(t) = Ci_m^2 R_{\lambda} \sin^2 \Omega t - D, \quad (5)$$

где

$$A = mc; \quad B = 4\pi b \sigma d \Theta_{\text{ср}}^3; \quad C = \frac{0,24}{l}; \quad D = \pi b \sigma d \Theta_{\text{ср}}^4;$$

$R_{\lambda}$  — сопротивление лампы при  $\Theta_{\text{ср}}$ .

Решение этого уравнения имеет вид

$$\Theta(t)_{\text{уст}} = \frac{Ci_m^2 R_{\lambda}/2 - D}{B} - \frac{Ci_m^2 R_{\lambda}}{2B \sqrt{1 + \left(2\Omega \frac{A}{B}\right)^2}} \sin \left( 2\Omega t + \arctg \frac{1}{2\Omega \frac{A}{B}} \right). \quad (6)$$

Если лампа подключена к источнику постоянного тока, то уравнение теплового баланса (3) примет вид

$$A \frac{d\Theta_{\text{ср}}}{dt} + D = Ci_0^2 R_{\lambda};$$

при этом установившееся значение соответствует

$$D = Ci_0^2 R_{\lambda} = \frac{Ci_m^2 R_{\lambda}}{2}. \quad (7)$$

Принимая во внимание (7), окончательно получим

$$\Theta(t)_{\text{уст}} = - \frac{\Theta_{\text{ср}}}{4 \sqrt{1 + (2\Omega \tau_{\lambda})^2}} \sin \left( 2\Omega t + \arctg \frac{1}{2\Omega \tau_{\lambda}} \right), \quad (8)$$

где  $\tau_{\lambda} = \frac{A}{B} = \frac{mc}{4\pi b \sigma d \Theta_{\text{ср}}^3}$  — постоянная времени лампы при теплообмене излучением.

Из (8) видно, что для уменьшения частотных искажений выгоднее работать при минимально возможных значениях  $\Theta_{\text{ср}}$ , т. е. вблизи «зажигания» лампы. При этом наблюдается увеличение постоянной времени,

что также снижает амплитуду колебания около установившегося значения. Причины возникновения погрешности при переходе на переменный ток низкой частоты у термопреобразователей [8, 9] и ФП в основном те же. Укажем лишь на возможность частичной компенсации погрешности за счет нелинейности лампы и фотосопротивления.

Для определенного интервала температур зависимость  $R_{\lambda}$  от температуры перегрева  $\Theta$  может быть задана в виде степенной функции

$$R_{\lambda} = R \Theta^{\alpha}, \text{ где } \alpha > 1.$$

Погрешность перехода по току  $\gamma_{fl}$ , возникающая на низких частотах за счет изменения сопротивления нити от температуры, равна

$$\gamma_{fl} \approx - \frac{\alpha(\alpha-1)}{8} \left[ \frac{\Theta(t)}{\Theta_{cp}} \right]^2 = - \frac{\alpha(\alpha-1)}{128(1+4\Omega^2\tau_{\lambda}^2)}. \quad (9)$$

Погрешность перехода, возникающая вследствие нелинейной зависимости сопротивления  $R_{\phi}$  от температуры нити лампы при условии, что сопротивление ФС считается безынерционным, определяется выражением

$$\gamma_{fl} \approx \frac{a}{2K_i \Theta_{cp}} \left[ \frac{\Theta(t)}{\Theta_{cp}} \right] = \frac{a}{32K_i \Theta_{cp} (1+4\Omega^2\tau_{\lambda}^2)}, \quad (10)$$

где  $a$  — постоянная в функции аппроксимации сопротивления ФС.

$$R_{\phi} = R' e^{a/\Theta}.$$

Противоположные знаки в выражениях (9) и (10) указывают на возможность некоторой коррекции.

#### ПОГРЕШНОСТЬ ИЗ-ЗА АСИММЕТРИИ

Погрешность из-за асимметрии обусловлена эффектами Томсона и Пельтье. Определено, что при быстром переключении концов лампы погрешность вследствие асимметрии составляет  $\pm 0,02\%$  (равенство токов до и после переключения контролировалось компенсатором). Однако указанная погрешность не является минимальной; ее можно уменьшить без двукратного компарирования путем выбора оптимальной ориентации лампы относительно фотосопротивления.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЕРКИ

Чувствительность индикатора компаратора составляет  $0,01\%$  на одно деление шкалы, если переключатель чувствительности находится в положении «Точно», и  $0,1\%$ , если переключатель чувствительности находится в положении «Грубо».

Выходное напряжение на зажимах «Цифровой вольтметр» при отключенной внешней цепи составляет  $10$  в действующего значения с погрешностью:

- а) не более  $\pm 0,03\%$  в диапазоне частот от  $50$  гц до  $100$  кгц;
- б) не более  $0,16\%$  в диапазоне частот от  $20$  до  $50$  гц\*.

\* При уменьшении значения номинального тока эта погрешность уменьшается. Так, для компаратора типа К-2 ( $I=16$  ма) погрешность в этом диапазоне частот не превышает  $\pm 0,05\%$ .



Постоянная времени сопротивления  $R_7$  составляет  $6,4 \cdot 10^{-9}$  сек, что не вызывает дополнительной погрешности на частотах до 100 кГц.

Входная емкость цифрового вольтметра (100 пф) вызывает дополнительную погрешность 0,03% на частоте 100 кГц.

Частота, гц	20	30	40	50
Погрешность, %	+0,16	+0,09	+0,06	+0,03

В заключение авторы благодарят Т. Б. Рождественскую за аттестацию компаратора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Б. Рождественская. Электрические компараторы для точных измерений тока, напряжения и мощности. М., Изд-во стандартов, 1964.
2. F. L. Hermach, E. S. Williams. Thermal voltage Converters for accurate voltage Measurements to 30 megacicles per. sec.—Communication and Electronics, July, 1960.
3. H. Russell Brownell. Thermoelement transfer devices.—Instrum. and Control Syst., 1963, v. 36, № 1.
4. В. И. Червякова. Термоэлектрические приборы. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
5. А. И. Фюрстенберг. Лампочка накаливания как индикатор равенства токов в двух цепях и применение ее для точных электрических измерений.—Докл. АН СССР, 1945, т. 48, № 1.
6. Andreas Ebinger. Verfahren und Geräte zur genauesten Strom-, Spannungs- und Leistungsmessung bei Wechselstrom.—Elektrotechnische Zeitschrift, 1960, B, Bd. 12, N 15, S. 360—366.
7. М. С. Ройтман. Индикатор отклонения электрического напряжения от установленной величины. Авторское свидетельство № 132329 от 25 янв. 1960 г. Бюллетень изобретений, 1960, № 19.
8. П. П. Орнатский. Применение термоэлектрических приборов на инфранизких частотах.—Измерительная техника, 1958, № 5.
9. О. Н. Гравин. Особенности применения термокомпараторов на инфранизких частотах.—Измерительная техника, 1963, № 12.

Поступила в редакцию  
20 февраля 1965 г.,  
после переработки —  
23 июня 1965 г.