

С. Т. ВАСЬКОВ, И. Ф. КЛИСТОРИН, А. М. КОВАЛЕВ,  
И. И. КОРШЕВЕР, Г. Г. МАТУШКИН  
(Новосибирск)

### ЦИФРОВОЙ МИЛЛИВОЛЬТМЕТР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обсуждается вопрос об измерении действующего значения периодического напряжения произвольной формы кривой. Приводится блок-схема цифрового милливольтметра переменного напряжения, принципиальная схема формирователя опорного напряжения прибора, а также результаты экспериментальных исследований.

Современные цифровые приборы, пригодные для измерения переменных напряжений, содержат, как правило, преобразователи переменного напряжения в постоянное по среднему значению. Полученное напряжение измеряется цифровым прибором постоянного тока, градуированным в действующих значениях синусоидального напряжения. Указанные преобразователи обладают большим временем установления на выходе (до нескольких секунд) из-за необходимости включения интегрирующих цепей с большими постоянными времени для получения малых пульсаций. Кроме того, высокая точность измерений обеспечивается при измерении только синусоидальных напряжений, для которых известен коэффициент формы кривой. При наличии в измеряемом напряжении наряду с основной составляющей гармонических составляющих высших частот появляется методическая погрешность измерения, зависящая от коэффициента формы.

Следует подчеркнуть, что не только преобразователи, о которых говорилось выше, но и вообще подавляющее большинство электро- и радиоизмерительных приборов для измерения переменных напряжений градуируются в действующих значениях, в то время как по принципу действия их показания могут быть пропорциональными среднему или пиковому значению измеряемого напряжения. В практике измерений часто приходится иметь дело с существенно несинусоидальными напряжениями и токами, коэффициенты формы и амплитуды которых заметно отличаются от соответствующих коэффициентов синусоидального напряжения. Это приводит к возникновению больших методических погрешностей (до десятков процентов), которые могут значительно превышать класс используемого прибора. По условиям измерительного эксперимента часто требуется получение именно действующего значения напряжения (тока). В связи с этим представляется несомненно важной разработка новых приборов, позволяющих с большой точностью измерять действующее значение переменного напряжения.

Для измерения переменных напряжений одним из авторов этой статьи [1] предложен способ, основанный на формировании опорного напряжения из измеряемого и использовании компенсационного метода. На основе этого способа разработан цифровой милливольтметр для измерения действующего значения периодических напряжений произвольной формы.

Прибор, структурная схема которого приведена на рис. 1, содержит устройство формирования опорного напряжения (ФОН) 1, делитель опорного напряжения 2, устройство сравнения 3, схему управления 4 и отсчетное устройство 5 [2]. Измеряемое

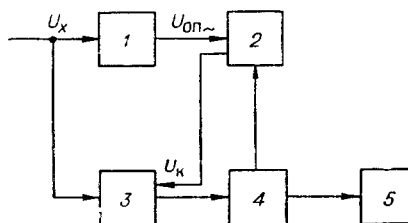


Рис. 1.

периодическое напряжение произвольной формы, спектр частот которого укладывается в определенном диапазоне, подводится к устройству 1. Последнее выполняет функции стабилизатора уровня опорного напряжения по действующему значению. Калибровка опорного напряжения производится путем его сравнения с известным напряжением источника постоянного тока. Сформированное таким образом опорное напряжение подается на делитель опорного напряжения прибора 2, который позволяет получить квантованное по уровню компенсационное напряжение  $u_k$ . С делителя опорного напряжения компенсационное напряжение в противофазе с измеряемым напряжением  $u_x$  подается на устройство сравнения 3, которое приводит в действие схему управления 4. Последняя управляет отсчетным цифровым устройством 5 и делителем опорного напряжения. В зависимости от знака разности напряжений  $u_x$  и  $u_k$  уровень компенсационного напряжения увеличивается или уменьшается до тех пор, пока разность  $u_x - u_k$  не примет значение, меньшее некоторого заданного порога срабатывания исполнительного устройства сравнения. Цифровой отсчет измеряемого напряжения однозначно соответствует положению ключей делителя опорного напряжения.

При формировании опорного напряжения в канале ФОН подвергается нелинейным и частотным искажениям, в результате чего опорное напряжение оказывается сдвинутым по фазе по отношению к измеряемому напряжению на некоторый угол, а форма его не повторяет точно форму измеряемого. Разность мгновенных значений напряжений  $u_x - u_k$  при изменении  $u_x$  не может быть сведена к нулю на входе устройства сравнения. Возникает вопрос, каким должен быть принцип действия устройства сравнения, чтобы обеспечить допустимые методические погрешности при необходимости установления равенства действующих значений напряжений  $u_x$  и  $u_k$ .

Из определения действующего значения следует соотношение

$$\sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} u_x^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_2} \int_0^{T_2} u_k^2 dt} . \quad (1)$$

На основе преобразования выражения (1) показано [3], что при условии незначительного различия в формах кривых  $u_x$  и  $u_k$  и при малом сдвиге по фазе между ними устройство сравнения может быть выполнено в виде синхронного детектора, на вход которого подается разность  $u_x - u_k$ , а моменты перехода напряжения коммутации через нуль опре-

Схема устройства формирования опорного напряжения может быть представлена в общем виде четырехполюсником с переменным коэффициентом передачи, описываемым уравнением

$$u_{\text{вых}} = k_v u_{\text{вх}}, \quad (2)$$

где  $u_{\text{вых}}$  и  $u_{\text{вх}}$  — соответственно выходное и входное напряжения;  
 $k_v = f(U_{\text{вх}})$  — коэффициент передачи, величина которого зависит от уровня входного напряжения.

Указанный четырехполюсник прежде всего обладает усилительными свойствами, поскольку опорное напряжение должно быть больше или по крайней мере равно максимальному значению измеряемого напряжения  $u_x$  на данном пределе измерения. В противном случае для обеспечения уравнивания измеряемого напряжения компенсационным напряжением  $u_k$  потребуются введение прецизионного делителя на входе устройства сравнения со стороны  $u_x$ . Это, в свою очередь, приведет к необходимости увеличить чувствительность схемы сравнения, чтобы обеспечить нужную величину погрешности дискретности прибора.

Условие неискаженной передачи формы кривой опорного напряжения по отношению к входному напряжению требует от устройства ФОН широкополосного усиления, начиная от низких звуковых частот (по крайней мере, от 50 гц), при незначительных нелинейных искажениях.

Таким образом, схема устройства ФОН должна быть широкополосным линейным усилителем с автоматически регулируемым коэффициентом усиления, обеспечивающим работу при больших изменениях величин входных напряжений. По-видимому, рационально выбирать изменение напряжения на входе не меньше чем в 10 раз на одном пределе измерения (например, от 10 до 100 мв). При этом, ориентируясь на построение цифровых приборов высокого класса точности, необходимо поставить требование, чтобы изменение опорного напряжения на выходе устройства ФОН не превышало величины порядка 0,1%. Кроме того, устройство ФОН должно иметь достаточно большое входное сопротивление для обеспечения минимума потребления энергии.

Коэффициент усиления усилителя можно представить следующим выражением:

$$k_v = f[\Pi, R_n, \beta, k_d], \quad (3)$$

где  $\Pi$  — параметр усилительного элемента (лампы, транзистора), от которого зависит усиление;

$R_n$  — сопротивление нагрузки;

$\beta$  — коэффициент передачи цепи обратной связи;

$k_d$  — коэффициент деления делителя, включенного между каскадами.

В широкополосных усилителях регулировка величины обратной связи в основном производится путем изменения величин активных сопротивлений. Поэтому автоматическая регулировка усиления (АРУ) в устройстве ФОН может быть осуществлена регулированием либо параметра усилительного элемента, либо величины активного сопротивления (нагрузки, сопротивления цепи обратной связи или цепи делителя).

Необходимость стабилизации опорного напряжения с малой погрешностью требует высокочувствительного измерительного элемента на выходе устройства ФОН, способного давать достаточное напряжение для управления цепью АРУ. Так как необходима стабилизация напряжения по действующему значению, то, следовательно, и измерительный элемент должен реагировать на величину этого значения. Для этой цели наиболее пригодными оказываются схемы компарирования, обеспечивающие в заданной рабочей точке высокую точность сравнения переменного напряжения с постоянным, величину которого можно задать с весьма малой погрешностью.

На основании высказанных выше соображений блок-схему устройства ФОН можно изобразить в виде параметрической системы автоматического регулирования, представленной на рис. 2, где  $K_v$  — усилитель с переменным коэффициентом усиления; И — измерительный элемент, в котором происходит сравнение выходного опорного напряжения  $U_{оп\sim}$  с постоянным калиброванным напряжением  $U_{оп=}$ ; величина последнего задает уровень стабилизации; У — усилитель сигнала АРУ.

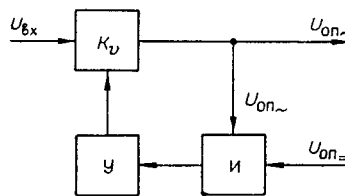


Рис. 2.

К изображенной на рис. 2 схеме могут быть сведены все применяемые системы с АРУ по действующему значению. Однако в зависимости от требуемых коэффициента стабилизации и точности поддержания выходного напряжения в схеме могут отсутствовать усилитель У и опорный источник постоянного тока с напряжением  $U_{оп=}$ . Уровень же стабилизации может быть задан параметрически. Изложенные выше соображения были положены в основу разработанных устройств ФОН.

Один из первых вариантов устройства ФОН был выполнен в виде широкополосного лампового усилителя, автоматическая регулировка усиления в котором осуществлялась посредством изменения крутизны пентодов 6Ж2П. В качестве измерительного элемента устройства использовался компаратор, представляющий собой мост на активных сопротивлениях с фотосопротивлением в одном из плеч. Фотосопротивление освещается лампой накаливания, включенной на выходе ФОН.

Экспериментальная проверка этой схемы показала ее удовлетворительную работу и возможность получения опорного напряжения в диапазоне 50 гц — 10 кгц с погрешностью порядка 0,2%. Время установления опорного напряжения 1 сек.

Однако при этом был выяснен ряд дополнительных требований к устройствам ФОН, обусловленных необходимостью повышения устойчивости и быстродействия цифрового милливольтметра; а также упрощения его наладки и эксплуатации. Учет этих требований привел к созданию более совершенных схем устройств ФОН. Описание одной из них, использованной в рассматриваемом милливольтметре, приводится ниже (рис. 3).

Для увеличения запаса устойчивости и упрощения настройки устройства при сохранении повышенной точности формирования опорного напряжения в данной схеме использована дополнительная ступень формирования, представляющая собой широкополосный усилитель на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$  с автоматической регулировкой усиления. Регулировка осуществляется посредством управления величиной фотосопротивления  $ФС_1$ , которое освещается лампой накаливания  $ЛН_1$  и находится в цепи обратной связи, охватывающей усилитель. Лампа накаливания  $ЛН_1$

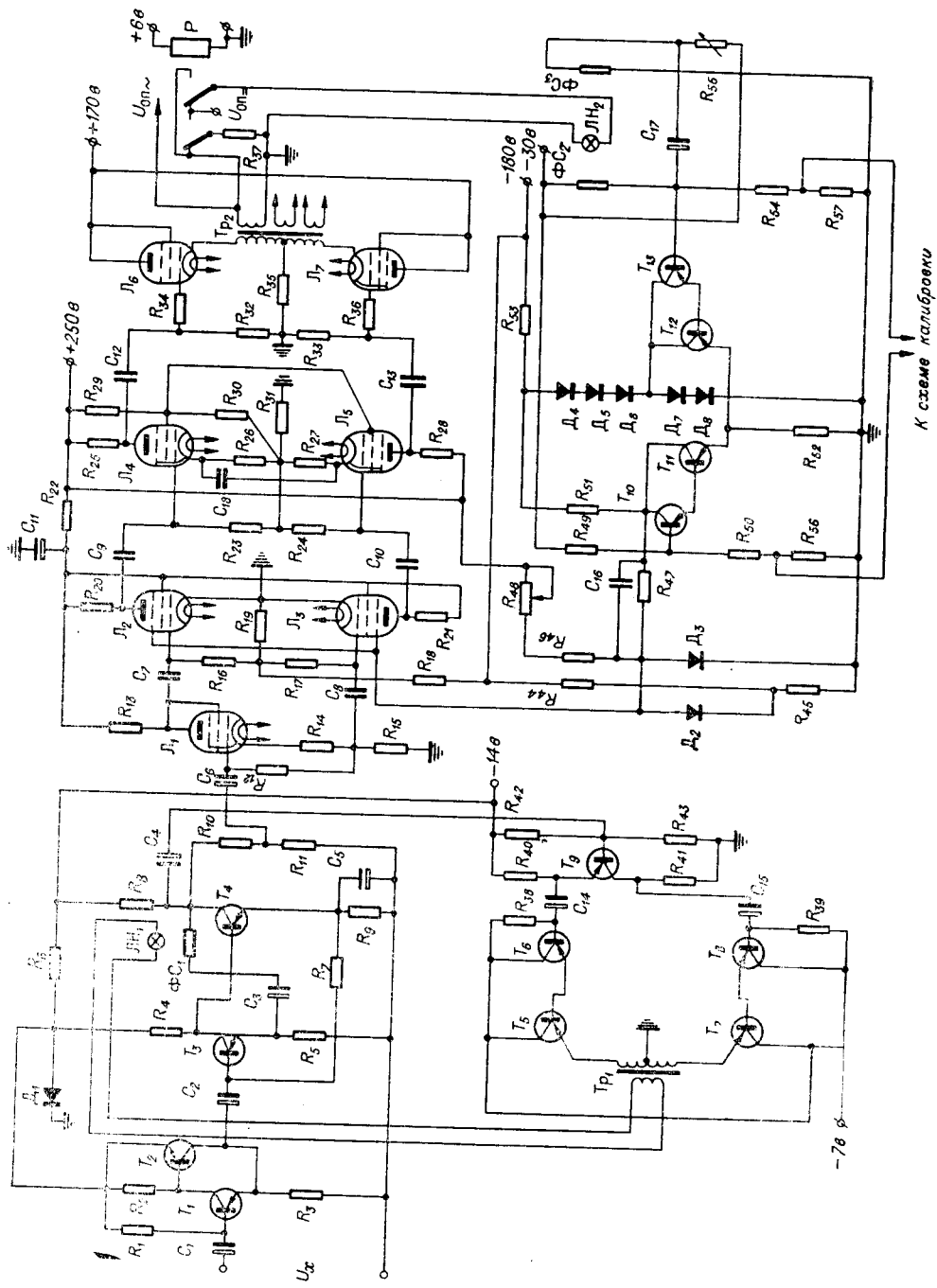


Рис. 3.

питается напряжением с выхода усилителя через фазоинвертор  $T_3$ , повторители  $T_4—T_7$  и трансформатор  $Tr_1$ .

Ступень предварительной стабилизации обеспечивает изменение напряжения на входе второй ступени на 2,8 дБ (55—76 мВ) при изменении входного напряжения на 20 дБ (10—100 мВ).

Основная ступень, осуществляющая окончательную стабилизацию, представляет собой ламповый усилитель ( $J_1—J_7$ ), на выходе которого через согласующий трансформатор  $Tr_2$  включена лампа накаливания ЛН<sub>2</sub>, освещающая фотосопротивление  $\Phi C_2$  измерительного элемента. АРУ в основной ступени осуществляется путем изменения крутизны ламп  $L_2, L_3$ . Напряжение АРУ представляет собой усиленный балансным усилителем  $T_{10}—T_{13}$  выходной сигнал измерительного элемента, возникающий в диагонали моста компаратора  $R_{49}, R_{50}, R_{56}, \Phi C_2, R_{54}, R_{57}$ .

При создании схем АРУ в усилителях низкой частоты возникает трудность, состоящая в том, что низкочастотные составляющие сигнала АРУ, которые появляются в переходном процессе и по частоте оказываются близкими к входному сигналу, могут усилиться вместе с последним и привести к нарушению условия устойчивости системы. Для предотвращения усиления сигнала АРУ в схеме основной ступени применен ряд специальных мер.

Во-первых, усилитель выполнен по балансной схеме так, что усиленный сигнал АРУ оказывается поданным на симметричные входы каскадов (третьи сетки ламп  $L_2, L_3$ ) в фазе и величина его на выходе незначительна. Формируемые сигналы после фазорасщепителя подаются на входы каскадов (первые сетки тех же ламп) в противофазе и благодаря этому на выходе каждого балансного каскада не вычитаются, как сигнал АРУ, а складываются.

Во-вторых, в общую катодную цепь двухтактного каскада  $L_4, L_5$  включено сопротивление  $R_{31}$ , которое является элементом отрицательной обратной связи по сигналу АРУ.

Принятые меры позволяют развязать цепи формируемого сигнала и сигнала АРУ и обеспечить устойчивость параметрической системы автоматического регулирования. Кроме того, увеличению устойчивости способствует разделение устройства ФОН на две ступени стабилизации. При этом благодаря уменьшению диапазона регулирования основной ступени требуется меньший коэффициент усиления в цепи обратной связи.

В схеме устройства ФОН предусмотрена автоматическая калибровка выходного напряжения. При этом лампа накаливания ЛН<sub>2</sub> подключается к опорному источнику постоянного тока  $U_{оп.}$ , и уравнивание измерительного элемента устройства производится путем шунтирования сопротивлений  $R_{56}, R_{57}$  параллельным делителем. Сопротивления этого делителя подключаются автоматически коммутатором, выполненным в виде последовательного двоичного счетчика на транзисторах.

С целью расширения диапазона формирования в область низких частот гармонические составляющие опорного напряжения в сигнале автоматической регулировки компенсируются с помощью делителя напряжения на линейном сопротивлении  $R_{55}$  и фотосопротивлении  $\Phi C_3$ , освещаемом лампой накаливания измерительного элемента.

Построенное по такой схеме устройство ФОН обеспечивает стабильность выходного напряжения  $U_{оп.} = 0,7$  в по действующему значению с погрешностью  $\pm 0,05\%$  при изменении входного напряжения на 20 дБ. Время установления выходного напряжения при скачкообразном изменении напряжения на входе, равном 20 дБ, составляет менее

**0,5 сек. Нелинейные и частотные искажения** не выходят за допустимые пределы в диапазоне от 50 гц до 20 кгц.

Следует отметить, что использование описанных устройств не ограничивается применением их только в цифровых компенсационных измерительных приборах для получения опорного напряжения. Они могут найти ряд других, самостоятельных приложений в измерительной технике.

Устройство ФОН может быть использовано в качестве приставки к измерительным приборам любой системы (например, к вольтметрам среднего или пикового значения) для измерения напряжений по действующему значению. Если шкала прибора линейна, то, подав перед измерением на вход прибора напряжение с выхода устройства ФОН, можно ввести градуировочную поправку в виде какого-либо численного коэффициента, который зависит от формы кривой и на который следует умножить показание прибора, чтобы получить действующее значение измеряемого напряжения. При переходе к измерению напряжений с другой формой кривой калибровка повторяется.

Л. И. Волгиным предложено использовать устройство ФОН при измерении переменных напряжений цифровым вольтметром постоянного тока с приставкой в виде линейного детектора среднего значения [4]. Предложенный способ позволяет получить отсчеты коэффициента формы кривой и величины действующего значения измеряемого напряжения.

Устройство ФОН может быть использовано при синтезе кривых определенного спектрального состава в некотором диапазоне частот. При этом ко входу его необходимо подключить суммирующее устройство, на которое подаются составляющие в нужном соотношении между собой. Величины составляющих можно регулировать в больших пределах. Выходное напряжение устройства ФОН, сформированное таким образом, может быть использовано при исследовании влияния уровня гармонических составляющих на точность измерения различных устройств (например, влияние величин высших гармоник на погрешность измерения вольтметрами среднего значения).

Делитель опорного напряжения, а также схема управления милливольтметра особой специфики по сравнению с соответствующими схемами цифровых приборов постоянного тока не имеют и поэтому в данной работе не рассматриваются.

Первые макеты цифровых милливольтметров переменного тока, построенных по рассмотренной выше схеме, позволили получить следующие результаты.

1. Измеряемое напряжение 10—100 мв. Следует отметить, что основная трудность встречается при расширении пределов измерения в области малых по величине напряжений. Поэтому в макетах приборов выбран один приведенный выше предел измерения. Измерение больших напряжений не встречает принципиальных трудностей и решается с помощью прецизионных делителей на входе прибора.

2. Диапазон частот измеряемых напряжений 50 гц — 20 кгц. Верхний предел по частоте дан для синусоидального напряжения. В общем случае для кривой произвольной формы невозможно указать однозначно верхнего предела по частоте при заданной допустимой погрешности измерения. Здесь возможны два пути: во-первых, можно задаться конкретной формой кривой и подсчитывать получающуюся методическую погрешность при известном принципе действия устройства сравнения и заданной амплитудно-фазовой характеристике канала формирования опорного напряжения и его амплитудной характеристике, опре-

деляющей нелинейные искажения; во-вторых, возможна некоторая приближенная оценка погрешности сверху при условии, что максимальная по частоте гармоника измеряемого напряжения не превышает некоторой граничной частоты. Очевидно, что полоса частот измеряемого напряжения тем более ограничена, чем больше по величине и номеру высших гармонических в составе этого напряжения.

3. Погрешность прибора по действующему значению не превышает 1% в указанном выше диапазоне частот при коэффициенте амплитуды, не превышающем двух.

4. Время измерения 2,5 сек.

Исследования макетов милливольтметров показали, что имеется реальная возможность снизить погрешность прибора в 5—7 раз при одновременном увеличении коэффициента амплитуды измеряемых напряжений до 4 и верхней границы частотного диапазона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Ф. Клисторин. Цифровые вольтметры действующих значений.— *Автоматрия*, 1966, № 2.
2. В. М. Белов, И. Ф. Клисторин, С. Т. Васьков, А. М. Ковалев, И. И. Коршевер, Г. Г. Матушкин. Французский патент № 1.409.950.
3. С. Т. Васьков. Об одном способе измерения переменных напряжений по действующему значению.— *Изв. Сиб. отд. АН СССР, серия техн. наук*, 1963, вып. 1, № 2.
4. Л. И. Волгин. Способ линейного преобразования переменного напряжения произвольной формы кривой в постоянное напряжение. Авторское свидетельство № 162222. *Бюллетень изобретений*, 1964, № 9.

*Поступила в редакцию  
23 ноября 1965 г.*