

В. М. БЕЛОВ, И. Ф. КЛИСТОРИН, А. Е. ПОДЗИН  
(Новосибирск)

### ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ЦИФРОВОГО ВОЛЬТМЕТРА

Успехи, достигнутые в области цифровых измерений электрических величин и особенно напряжений постоянного тока, в значительно меньшей степени коснулись автоматических цифровых вольтметров (АЦВ) переменного тока. В то же время практика показывает, что исследователю все чаще приходится сталкиваться с необходимостью точного измерения периодических напряжений, как правило, несинусоидальной формы в широкой полосе частот. При этом уровень измеряемого сигнала может изменяться в весьма широких пределах (от сотен микровольт до сотен вольт).

Как было показано в [1], наиболее удобной характеристикой периодического напряжения произвольной формы следует считать его действующее (или эффективное) значение. Поэтому ниже будет рассмотрен принцип построения универсального АЦВ, предназначенного для измерения напряжений переменного тока по действующему значению и напряжений постоянного тока.

При создании АЦВ переменного тока возникает ряд специфических трудностей, основные из которых сводятся к обеспечению высокого быстродействия и необходимой точности измерения в широкой полосе частот и в широком динамическом диапазоне входных напряжений.

Первая трудность обусловлена необходимостью проведения операции интегрирования, что следует из определения действующего значения. В связи с этим вольтметр, как правило, содержит инерционный элемент (например, электротепловой преобразователь), постоянная времени которого значительно больше максимального периода измеряемого напряжения.

Для получения заданной точности измерения напряжений в достаточно широкой полосе частот к тракту прохождения измеряемого сигнала должно быть предъявлено требование широкополосности. При необходимости расширения пределов измерения положение осложняется еще и тем, что к входным устройствам (делителям и предварительным усилителям) предъявляется дополнительно требование температурной и временной стабильности их коэффициентов передачи. Очевидно, что реализация четырехполюсников такого типа в настоящее время весьма затруднительна.

Один из очевидных путей преодоления указанных трудностей — совершенствование элементов измерительной цепи переменного тока. Более рациональный путь заключается в таком совершенствовании структурной схемы АЦВ, чтобы уже сейчас можно было удовлетворить современным требованиям, базируясь на серийно выпускаемых элементах.

Несколько лет назад в [2] был предложен принцип построения АЦВ переменного тока, получивший в дальнейшем название принципа «формирования опорного напряжения».

Суть этого принципа можно пояснить по структурной схеме, приведенной на рис. 1. На первом этапе измеряемое напряжение, спектр частот которого укладывается в определенный диапазон, подается на так называемое устройство формирования опорного напряжения (ФОН), включающее в себя широкополосный усилитель с дополнительным регулирующим входом, компаратор действующих значений и цепь обратной связи. Функции устройства ФОН состоят в том, чтобы при любом уровне входного напряжения  $U_x(t)$  (в пределах заданного диапазона) обеспечить на выходе переменное напряжение  $U_{оп \sim}$ , равное по действующему значению опорному  $U_0$ , а также совпадающее по форме и не имеющее сдвига во времени с входным напряжением.

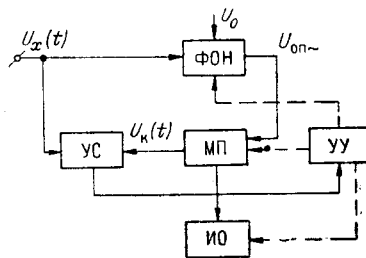


Рис. 1.

На втором этапе полученное таким образом  $U_{оп \sim}$  подается на дискретный масштабный преобразователь МП (декадный делитель), с выхода которого снимается компенсационное напряжение  $U_k(t)$  и сравнивается с измеряемым  $U_x(t)$  при помощи устройства сравнения УС. Выходной сигнал устройства сравнения воздействует на устройство уравнивания УУ, исполнительные элементы которого производят необходимые переключения в масштабном преобразователе МП. Процесс уравнивания продолжается до тех пор, пока разность между измеряемым и компенсационным напряжениями не станет меньше некоторой величины — единицы дискретности. Результат измерения фиксируется индикатором отсчета ИО, связанным с блоками МП и УУ.

В АЦВ, построенном по данному принципу, время измерения определяется временем формирования опорного напряжения  $U_{оп \sim}$  и временем уравнивания входного и компенсационного сигналов. Одна из особенностей схемы АЦВ заключается в том, что инерционный компарирующий преобразователь является составным звеном системы автоматического регулирования — устройства ФОН. Очевидно, что изменением динамических свойств этой системы можно до известных пределов уменьшать время формирования  $U_{оп \sim}$ , а следовательно, и повышать быстродействие АЦВ.

Кроме того, предложенный принцип позволяет получить малую погрешность измерения благодаря применению в нем двух наиболее точных методов: метода компарирования (на первом этапе измерения) и компенсационного метода (на втором этапе).

Однако принцип «формирования опорного напряжения» имеет и ряд существенных недостатков, которые не позволяют полностью воспользоваться указанными выше достоинствами.

В результате исследований было выяснено, что в схеме по рис. 1 устройство сравнения должно быть синхронным детектором с фильтром

нижних частот, который, естественно, ограничивает быстродействие вольтметра. С другой стороны, как видно из рис. 1, устройство ФОН, дискретный масштабный преобразователь МП и устройство сравнения УС включены в компенсационную цепь, работающую на измеряемом сигнале. Это приводит к тому, что к указанным блокам предъявляется не только требование равномерности амплитудно-частотной характеристики, но и отсутствия фазовых искажений сигнала во всем диапазоне частот. Расширение динамического диапазона входных напряжений может быть достигнуто путем использования измерительных широкополосных делителей и усилителей, причем в последнем случае к чувствительности устройства сравнения предъявляются повышенные требования. Это также следует отнести к недостаткам рассмотренной схемы.

Дальнейшее развитие принципа «формирования опорного напряжения» привело к структурной схеме, изображенной на рис. 2 [3].

Нетрудно заметить, что по окончании первого этапа — формирования опорного напряжения — устанавливается однозначное соответствие между величиной действующего значения измеряемого напряжения  $U_x$  и коэффициентом передачи широкополосного усилителя устройства ФОН  $K_n$ :

$$U_x = \frac{U_0}{K_n}. \quad (1)$$

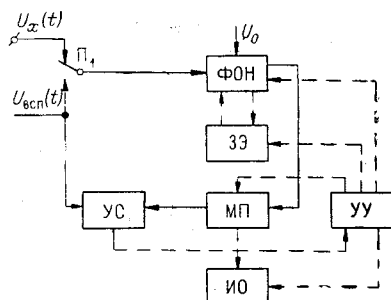


Рис. 2.

Следовательно, второй этап измерения — уравнивание компенсационной цепи и выражение результата в числовой форме — может быть произведен и без помощи измеряемого напряжения  $U_x(t)$ .\*

Основной отличительной особенностью схемы, изображенной на рис. 2, является то, что после окончания процесса формирования опорного напряжения коэффициент передачи широкополосного усилителя фиксируется при помощи специально предусмотренного запоминающего элемента ЗЭ [4]. При этом источник измеряемого напряжения отключается от входа устройства ФОН. Определение же величины  $\frac{1}{K_n}$  в цифровой форме производится с помощью цепи, включающей усилитель устройства ФОН, дискретный масштабный преобразователь МП, устройство сравнения УС и устройство уравнивания УУ, причем в эту компенсационную цепь вводится вспомогательное переменное напряжение  $U_{всп}$ , например, прямоугольной формы (типа меандров), основная частота которого лежит в области средних частот звукового диапазона.

Основное уравнение, соответствующее окончанию процесса уравнивания компенсационной цепи, может быть записано в виде

$$U_{всп} K_n \alpha \bar{N} - U_{всп} \leq \frac{1}{2} \Delta, \quad (2)$$

где  $\alpha \bar{N}$  — коэффициент передачи МП;  $\Delta$  — абсолютная величина напряжения, соответствующая ступеньке дискретности.

\* Кстати, заметим, что, помимо компенсационного метода, здесь может быть использован любой из известных методов определения коэффициентов передачи четырехполюсников.

С учетом (1) можно установить следующую связь между измеряемым напряжением  $U_x$  и цифровым отсчетом  $\bar{N}$ :

$$U_x \approx U_0 \alpha \left( \bar{N} \pm \frac{\Delta}{4 U_{\text{всп}}} \right). \quad (3)$$

Отсюда легко найти, что абсолютная величина ступеньки дискретности, приведенная ко входу устройства сравнения, зависит от величины  $\bar{N}$  и равна

$$\Delta = \frac{2 U_{\text{всп}}}{\bar{N}}. \quad (4)$$

Эта особенность указывает на возможность построения вольтметра с постоянной по шкале относительной погрешностью.

Из (3) следует также, что относительная погрешность измерения составляет

$$\delta = \delta_{U_0} + \delta_{\alpha}. \quad (5)$$

В выражении (5) первое слагаемое определяется нестабильностью опорного напряжения  $U_0$ , задающего уровень  $U_{\text{оп}}$ , ошибкой устройства ФОН при установлении равенства между  $U_0$  и  $U_{\text{оп}}$ , а также неточностью запоминания управляющего воздействия при помощи реального ЗЭ. Второе слагаемое обусловлено неточностью подгонки и нестабильностью элементов дискретного масштабного преобразователя.

Как видно из уравнения (3), цифровой отсчет измеряемого напряжения практически не зависит от величины (а следовательно, и стабильности) вспомогательного напряжения  $U_{\text{всп}}$ , что позволяет выбирать его в соответствии с чувствительностью устройства сравнения. Здесь необходимо подчеркнуть, что величина  $U_{\text{всп}}$  все же не может быть сколь угодно большой из-за ограничений сигнала в усилителе устройства ФОН. Однако эту трудность можно в известной степени преодолеть, если МП установить на входе устройства ФОН, а уравнивание компенсационной цепи начинать с одной из младших декад.

Укажем еще на ряд особенностей структурной схемы рис. 2. Прежде всего дискретный масштабный преобразователь и устройство сравнения работают здесь на фиксированной частоте вспомогательного сигнала  $U_{\text{всп}}$ , которая, кстати, выбирается весьма низкой (порядка 400—800 гц). Это приводит к тому, что к указанным узлам не предъявляется жестких требований в отношении амплитудно-частотных и фазовых искажений (последнее относится также и к усилителю устройства ФОН, так как действующее значение периодического сигнала не зависит от фазовых соотношений гармоник). Кроме того, при фиксированной частоте  $U_{\text{всп}}$  устройство сравнения может быть выполнено в виде синхронного детектора без фильтра, что позволяет уменьшить время уравнивания компенсационной цепи и, следовательно, повысить быстродействие АЦВ.

Следующая особенность данной структурной схемы заключается в том, что здесь можно избежать дополнительной погрешности из-за нестабильности (временной и температурной) коэффициентов передачи входных цепей, служащих для расширения пределов измерения. Для этого достаточно уровень вспомогательного напряжения выбрать таким, чтобы при той же чувствительности устройства сравнения входные делители и усилители можно было бы непосредственно включить в компенсационную цепь. Очевидно, что указанную особенность схемы следует рассматривать как одно из важнейших достоинств предложенного принципа.

Наконец, нетрудно заметить, что структурная схема, изображенная на рис. 2, содержит почти все необходимые узлы АЦВ постоянного тока. Это указывает на то, что, используя предложенный принцип, практически без увеличения оборудования и габаритов может быть создан универсальный АЦВ, предназначенный для измерения напряжений переменного и постоянного тока.

В заключение следует сказать, что в настоящее время в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР реализован первый макет универсального АЦВ по данному принципу. Результаты экспериментальных исследований подтверждают основные положения настоящей работы. Разработанный макет АЦВ имеет следующие технические характеристики.

1. Пределы измерений:
  - а) на переменном токе: 100 мкв — 10 мв (при чувствительности 1 мкв); 10 мв — в 1 в; 100 мв — 10 в; 1—100 в; 10—300 в;
  - б) на постоянном токе: 100 мкв — 1 в; 1 мв — 10 в; 10 мв — 100 в; 100 мв — 1000 в.
2. Полоса частот: 20 гц — 200 кГц;
3. Коэффициент амплитуды (пикфактор) измеряемых напряжений не более 4.
4. Погрешность измерения  $\pm (0,1 \div 0,2\%) U_x \pm 1$  знак.
5. Время измерения: а) на переменном токе 1 сек; б) на постоянном токе 0,2 сек.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Ф. Клисторин. Цифровые вольтметры действующих значений.— *Автометрия*, 1966, № 2.
2. И. Ф. Клисторин. Способ компенсационного метода измерений напряжений переменного тока. Авторское свидетельство № 201535.— ИПОТЗ, 1967, № 18.
3. В. М. Белов, И. Ф. Клисторин, А. М. Ковалев, Ю. Ф. Чусовков. Автоматический цифровой милливольтметр переменного тока. Авторское свидетельство № 221163.— ИПОТЗ, 1968, № 21.
4. И. Ф. Клисторин, А. Е. Подзин, Ю. Ф. Чусовков. Устройство для масштабного преобразования напряжения с запоминанием коэффициента передачи. Авторское свидетельство № 221821.— ИПОТЗ, 1968, № 22.

Поступила в редакцию  
6 ноября 1968 г.