

В. И. ЗОЗУЛЯ, П. П. ОРНАТСКИЙ,  
Л. П. ТКАЧЕНКО, В. Г. ЦЫВИНСКИЙ

(Киев)

### ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 0,01—1000 гц

Для измерения напряжений в диапазоне частот 0,01—1000 гц может быть использовано большое количество методов как аналоговых, так и цифровых [1—3]. Очевидно, для измерения амплитудных значений, с одной стороны, средних и действующих — с другой, необходимо применять принципиально различные методы. Измерение амплитудных значений сводится к измерению мгновенных значений, а измерение средних и действующих значений — к усреднению или интегрированию за целое число периодов.

Рассмотрим возможности различных методов измерения в различных частях частотного диапазона. Как показывают исследования [4], для измерения амплитудного значения могут быть использованы одни и те же методы во всем частотном диапазоне, т. е. для всего диапазона 0,01—1000 гц возможно построение одного прибора. При измерении средних и действующих значений путем усреднения с помощью повышенной инерционности или повышенного успокоения рабочий диапазон частот прибора может быть получен порядка 0,5 гц и выше. Попытки распространить этот метод на частоты ниже 0,5 гц приводит к недопустимому возрастанию времени установления. Оно может быть определено по формуле (для инерционной системы первого порядка)

$$t_{уст} = \frac{1}{4\pi f\gamma} \ln \frac{1}{\gamma},$$

где  $f$  — нижняя граница частотного диапазона;  $\gamma$  — погрешность прибора. Так, при  $\gamma = 1,5\%$  и  $f = 0,1$  гц время установления 4 мин. Помимо этого, реализация такой системы весьма затруднительна.

С другой стороны, на частотах 0,01—1 гц возможно осуществление дискретного интегрирования. При этом могут быть использованы средние по быстрдействию элементы. Нетрудно показать, что на частоте 1 гц и ниже погрешность не более 0,1% может быть получена при быстрдействии дискретного измерителя порядка 100 измерений в секунду. Вместе с тем попытка распространить эти методы на более высокие частоты приводит к резкому повышению быстрдействия дискретного измерителя. Так, на частоте измеряемого напряжения 1 кгц необходимое быстрдействие при той же погрешности должно быть не менее 100000 измерений в секунду. При этом на частотах порядка единиц герц происходит недопустимое переполнение счетного устройства.

Даже такое предварительное сопоставление методов позволяет сделать вывод о том, что при измерении среднего и действующего значений необходимо разбивать весь частотный диапазон на два в зависимости от предпочтительных методов измерения. При измерении амплитудных значений, как было отмечено выше, в таком разделении нет необходимости.

Авторами разработан амплитудный вольтметр инфранизкой частоты со следующими характеристиками: диапазон частот входных напряжений 0,005—1000 гц; входные напряжения: 1, 3, 10, 30, 100, 300, 1000 в; входное сопротивление 1 Мом; класс точности 2,5; питание — сеть 220 в ± 10%.

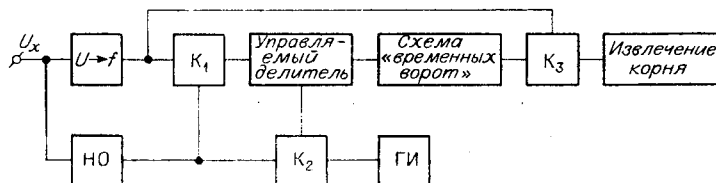


Рис. 1.

Блок-схема прибора представлена на рис. 1. Перед началом измерения кнопкой К разряжается конденсатор С. Измеряемое напряжение через делитель ДН и эмиттерный повторитель ЭП<sub>1</sub> подается на амплитудный детектор АД. После детектирования через повторитель ЭП<sub>2</sub> измеряемое напряжение подается на один вход нуля-органа НО. На второй вход нуля-органа включается выходное напряжение  $U_{к_2}$  с выхода усилителя ЭУ. Ноль-орган срабатывает, когда  $U_x > U_{к_2}$  воздействует на реле Р и своим контактом замыкает цепь заряда конденсатора С от источника Е<sub>1</sub>. При достижении компенсирующим напряжением  $U_{к_2}$  значения, равного  $U_{x_{max}}$ , ноль-орган возвращается в исходное состояние, реле Р отпускает и цепь заряда конденсатора С размыкается.

Входное сопротивление электрометрического усилителя и сопротивление изоляции контактов реле нетрудно сделать значительным (порядка  $10^{12}$  ом). При этом конденсатор С за время снятия показаний выходного прибора ВП разрядится незначительно. Если полупериод измеряемого напряжения содержит несколько максимумов, то на конденсаторе С сохранится информация о наибольшем из них.

Погрешности прибора, как показывает анализ, в основном являются функциями частоты. Погрешность прибора определяется следующим выражением:

$$\gamma_e = \gamma_n + \gamma'_{чист} + \gamma''_{чист} = -\frac{1}{fC} \left( \frac{1}{r_{ут.к}} + \frac{1}{r_{вх}} + \frac{1}{r_{ут.р}} \right) \cdot 100\% + \frac{\Delta U_{отп} + v(t_{отп} + t_{НО})}{U_{вх}} \cdot 100\% - \frac{\pi^2 f^2 (t_{ср} + t_{НО})}{2} \cdot 100\%.$$

Здесь  $\gamma_n$  — погрешность от разряда конденсатора С;  $\gamma'_{чист}$  и  $\gamma''_{чист}$  — погрешности, вызванные гистерезисом системы ноль-орган — реле; С — емкость конденсатора С;  $r_{ут.к}$  — сопротивление утечки этого конденсатора;  $r_{вх}$  — входное сопротивление электрометрического усилителя;  $r_{ут.р}$  — сопротивление изоляции между контактами реле;  $\Delta U_{отп}$  — напряжение отпускания нуля-органа;  $v$  — скорость заряда конденсатора;

$t_{отп}$  — время отпущения реле;  $t_{но}$  — время срабатывания нуль-органа;  $U_{вх}$  — номинальное значение входного напряжения;  $f$  — частота измеряемого напряжения.

Слагаемые суммарной погрешности на различных участках диапазона влияют по-разному. Первое слагаемое проявляется себя в основном на самых низких частотах. Второе слагаемое от частоты не зависит и определяется качеством реле и нуль-органов. Наконец, третье слагаемое проявляется себя на средних частотах диапазона (до нескольких герц), когда постоянная времени амплитудного детектора еще не обеспечивает заданной точности измерения.

Как показали исследования, суммарная погрешность прибора не превышает 1,5%.

Остановимся более подробно на особенностях аналоговых методов измерения средних и действующих значений. К этим методам можно отнести: а) подавление переменной составляющей с помощью инерционности и успокоения; б) интегрирование за целое число периодов. Существует ряд других методов [5]. В настоящей статье рассматриваются только два вышеуказанных метода.

А. Подавление переменной составляющей может быть осуществлено: 1) увеличением инерционности и успокоения прибора-измерителя; 2) применением электрической инерционности (фильтров); 3) применением тепловой инерционности.

Увеличение любого из этих параметров приводит к значительному возрастанию времени установления прибора. Как показывает анализ, если применить повышенную инерционность измерителя, то на частотах 0,1 гц время установления составляет 7 мин 20 сек (при классе точности 3%). Несколько лучше результаты при применении повышенного успокоения: 1 мин 30 сек. Наилучшие результаты могут быть получены при использовании критического режима работы прибора. При этом имеют место следующие соотношения:

$$\gamma = \frac{1}{1 - 4 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}, \quad t_{уст} = \frac{1}{\omega_0} \ln \frac{1}{\gamma},$$

где  $\omega_0$  — частота собственных колебаний прибора.

Время установления для прибора кл. 1,0 и частоты 0,5 гц получается порядка 6—10 сек. Этот прибор должен иметь по сравнению с существующими в 100 раз больший момент инерции подвижной части и в 10 раз больший коэффициент успокоения. Создание такого измерителя возможно при использовании последних достижений приборостроения. По предварительным соображениям, для достижения этих параметров требуется магнитный подвес и жидкостное успокоение.

Авторами разработан и изготовлен макет измерителя ферродинамической системы оригинальной конструкции с разомкнутой магнитной цепью. Период собственных колебаний 7—8 сек, ток полного отклонения 1,2 ма. Для успокоения применен специально разработанный для этого прибора воздушный успокоитель. Колебания указателя на частоте 1 гц — 1 мм, на частоте 0,5 гц — 4 мм. Время установления — 10 сек.

Измеритель имеет низкий коэффициент уравновешенности. В процессе конструктивной доработки прибора этот недостаток может быть устранен.

Путем применения тепловой инерционности могут быть получены аналогичные результаты. Однако технические характеристики существующих термопреобразователей не позволяют производить измерения

на частотах ниже 5 гц. Подавление переменной составляющей на выходе термопреобразователей малоэффективно. Для целей измерения на инфранизких частотах разработан и изготовлен специальный термометаллический измеритель, имеющий время установления порядка 15 сек, ток полного отклонения 15 ма, сопротивление 10 ом.

Наиболее просто подавление переменной составляющей осуществляется с помощью электрических фильтров. При этом эффективность подавления растет с увеличением числа звеньев фильтра. Для развязанных фильтров имеют место соотношения:

$$\omega \tau = \sqrt{\gamma^2 - \frac{2}{n-1}}; \quad \gamma = t^{-\frac{1}{\tau}} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\left(\frac{t}{\tau}\right)^i}{i!},$$

где  $\tau$  — постоянная времени звена фильтра;  $n$  — число звеньев;  $t$  — время установления. По этим формулам могут быть определены требуемое число звеньев и время установления. Так, при погрешности 1% для частоты 0,5 гц число звеньев порядка 4—5, а время установления порядка 20 сек.

Для неразвязанных фильтров формулы усложняются:

$$\gamma = n \int_0^t \frac{I_n\left(\frac{2}{\tau} u\right)}{u} e^{-\frac{2}{\tau} u} du;$$

$$\gamma^2 - \frac{1}{n} - 1 = \omega \tau \sqrt{1 + 2 \sqrt{1 + \frac{16}{\omega^2 \tau^2}} \cos \frac{\arctg \frac{4}{\omega \tau}}{2}},$$

где  $I_n$  — функция Бесселя  $n$ -го порядка. Анализ показывает, что время установления при этом возрастает примерно в два раза по сравнению с развязанными фильтрами.

Разработан и изготовлен милливольтметр действующих значений с четырехзвенным фильтром на выходе. Время установления 45—50 сек, нижняя граничная частота 0,5 гц.

Б. Аналоговые интеграторы напряжения могут быть построены на основе электромеханических устройств и электронных устройств. Они могут быть компенсационными, с дифференцирующим звеном в обратной связи, или прямого преобразования, которые, в свою очередь, могут иметь параметрическую компенсацию или не иметь ее.

Электронные интегрирующие устройства имеют ограничения частотного диапазона снизу. Погрешность интегрирования с учетом фазовой погрешности выражается формулами:

$$\gamma = \frac{3}{4 \omega^2 \tau^2}; \quad \gamma = \frac{3}{4 \alpha^2 \omega^2 \tau^2}; \quad \gamma = \frac{3}{4(1+k)^2 \omega^2 \tau^2},$$

где  $\tau = RC$  — устройства;  $\omega$  — частота интегрируемого напряжения;  $\alpha$  — коэффициент параметрической компенсации;  $k$  — коэффициент усиления усилителя. Из этих формул видно, что при коэффициенте усиления порядка 1000 на частоте 0,01 гц с помощью решающего усилителя может быть получена погрешность порядка 0,2—0,5%. Но при этом динамический диапазон усилителя должен быть порядка 500—1000. Если же не-

обходимо обеспечить точность такого порядка в некотором диапазоне частот, динамический диапазон соответственно должен увеличиваться:

$$k_d = \frac{f_{\max}}{\gamma f_{\min}}$$

Динамический диапазон электронных усилителей, как правило, не превышает 1000. Поэтому при измерении с погрешностью 1% максимальная ширина частотного диапазона 20 дБ. Этого можно избежать, включив в схему прибора устройство, переключающее в зависимости от частоты постоянную интегрирования. Однако это усложняет схему, и построение приборов на основе такой схемы становится нецелесообразным.

Электромеханические интегрирующие устройства свободны от указанного недостатка, если выходная величина (интеграл) представлена в виде угла поворота. В этом случае возможна постановка редуктора с практически неограниченным динамическим диапазоном. Такие интеграторы имеют ограничения частотного диапазона сверху. Выражение для погрешности имеют вид

$$\gamma = \frac{\tau \omega \sqrt{[a \tau \omega (1 + k - \tau^2 a \omega^2) - (1 + a^2) \tau \omega]^2 + (1 + a^2) (1 + k)^2}}{(1 + k - \tau^2 a \omega^2)^2 + (1 + a^2) \tau^2 \omega^2},$$

где  $\tau$  — постоянная времени двигателя;  $a = \frac{\tau}{T}$ ;  $T$  — постоянная времени усилителя;  $k$  — коэффициент усиления усилителя. При  $\gamma = 0,5\%$ ,  $k = 100$ ;  $a = 0,05$ ;  $\tau = 0,042$  сек  $f_{\max} = 1,92$  гц.

Таким образом, можно осуществить интегрирование в диапазоне частот от сотых долей герца до единиц герц с погрешностью порядка 1%. Однако преимущества электромеханических интеграторов в смысле ширины динамического диапазона не могут быть использованы, так как устройство деления накопленного интеграла на период практически нельзя выполнить, если интеграл представлен в виде угла поворота нескольких валов. Существующие способы аналогового деления (с помощью логометров, автоматических компенсаторов и т. д.) обладают малым динамическим диапазоном. В то же время очевидно, что устройство деления должно иметь не меньший динамический диапазон, чем делимое и делитель.

Таким образом, аналоговые интегрирующие устройства не могут быть положены в основу устройств для измерения средних значений напряжений в диапазоне инфранизких частот. Тем более это относится к измерению действующих значений, так как необходимость применения аналоговых квадраторов, способных работать на постоянном токе, либо значительно снижает точность измерения, либо увеличивает сложность схемы [6].

Цифровые приборы для измерения напряжений в диапазоне частот 0,01—1 гц могут быть построены на различных принципах. Наиболее рациональными, по нашему мнению, являются приборы на основе измерительного частотного преобразователя (ИЧП) и на основе обработки мгновенных значений. В настоящее время разработаны и внедряются [7] преобразователи напряжения в частоту, с помощью которых можно измерять напряжения порядка 100 мкв с погрешностью не более 0,1%. Поэтому разработка цифровых приборов на основе ИЧП может быть рекомендована для измерения весьма малых инфранизкочастотных напряжений.

Блок-схема измерения приведена на рис. 1. Измеряемое напряжение поступает на вход преобразователя напряжения в частоту импуль-

сов  $V \rightarrow f$ , и на нуль-орган НО, формирующий границы периода измеряемого напряжения. В течение одного периода импульсы с генератора импульсов ГИ через ключ  $K_2$  поступают на управляемый делитель, устанавливая его коэффициент деления пропорциональным периоду

$$k_x = f_2 T,$$

где  $f_2$  — частота импульсов генератора;  $T$  — период. Во втором периоде импульсы с частотой  $f = k_f u$ , где  $k$  — коэффициент преобразования частотного преобразователя, поступают на вход управляемого делителя. На его выходе импульсы следуют с частотой

$$f_x = \frac{k_f}{k_x} u = \frac{k_f u}{f_2 T}.$$

Эти импульсы запускают схему «временных ворот», открывающую ключ  $K_3$  на время  $\Delta t$  всякий раз, когда на ее вход поступает импульс. Таким образом, «плотность» временных промежутков возрастает с увеличением входного напряжения пропорционально ему. С другой стороны, частота заполнения этих промежутков также пропорциональна величине входного напряжения. Поэтому средняя частота импульсов, проходящих ключ  $K_3$ , пропорциональна квадрату входного напряжения:

$$f_{cp} = f \Delta t'_{cp} = k_f u \frac{k_f u}{f_2 T} \Delta t = \frac{k_f^2 \Delta t}{f_2 T} u^2,$$

где  $\Delta t'_{cp}$  — плотность временных промежутков. Число импульсов, прошедших через ключ, за период:

$$N = \int_0^T f_{cp} dt = \frac{k_f^2 \Delta t}{f_2 T} \int_0^T u^2 dt,$$

т. е. пропорционально квадрату действующего значения измеряемого напряжения.

Методическая погрешность такого измерения включает в себя погрешность от аппроксимации (из-за замены интеграла суммой) и погрешность от дискретности. Первая может быть записана в виде [4]

$$\gamma = \left( \frac{K_a}{4\pi K_\Phi U_m n} \sum_{i=1}^n u \left\{ F \left[ 1 - \frac{U_m}{K_a K_\Phi n} + \Phi(0) \right] \right\} - 0,5 \right) \cdot 100\%,$$

где  $K_a$  и  $K_\Phi$  — коэффициенты амплитуды и формы кривой измеряемого напряжения соответственно;  $\Phi(t)$  — первообразная функция  $u(t)$ ;  $F(u)$  — функция, обратная функции  $\Phi(t)$ ;  $n$  — число открываний ключа  $K_3$  в течение периода. Эта зависимость может быть аппроксимирована функцией

$$\gamma = \frac{A}{n^b},$$

где  $A$  и  $b$  — числа, зависящие от формы кривой измеряемого напряжения. Значения  $A$  и  $b$  для различных кривых приведены в таблице.

Так, для синусоиды при  $n=100$   $\gamma=0,056\%$ . Погрешность от дискретности выражается следующей формулой:

$$\gamma_x = \frac{100 K_a}{K_f U_m \Delta t \sqrt{n}} \%,$$

а так как

$$\Delta t \ll \frac{K_d}{K_f U_m},$$

то

$$\gamma \gg \frac{100 K_d}{K_d \sqrt{n}} \%.$$

Так, для синусоиды при  $K_d = 200$  и  $n = 100$   $\gamma = 0,07\%$ .

Таблица

Форма кривой	Синус	Треугольник	$n = t^2$	Трапеция		
				$\alpha$	$30^\circ$	$45^\circ$
A	90	125	200	—	90	100
b	1,6	1,76	1,33	—	1,417	1,532

В таблице  $\alpha$  — угол «отсечки» трапеции. Рассмотрим схему рис. 2. Измеряемое напряжение поступает на схему измерения мгновенных значений «измерение  $U_i$ » и нуль-орган (НО), определяющий границы периодов измеряемого напряжения. Далее, измеренные значения либо сразу суммируются (для получения среднего значения), либо после предварительного возведения в квадрат (для получения действующего значения измеряемого напряжения).

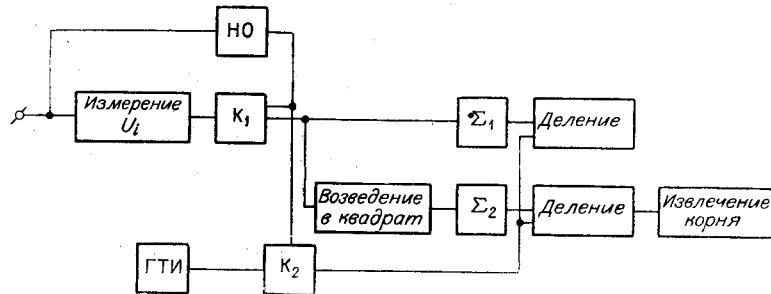


Рис. 2.

Погрешность от аппроксимации при измерении средних значений

$$\gamma = - \frac{\pi^2}{3 n^2} \frac{\sum_{i=1}^m a_i \cos \varphi_i}{\sum_{i=1}^m a_i \frac{\cos \varphi_i}{i}} \cdot 100\%,$$

где  $a_i$  и  $\varphi_i$  — амплитуды и фазы  $i$ -й гармоники относительно первой гармоники в кривой измеряемого напряжения;  $m$  — число всех гармоник. Так, для синусоиды при  $n = 100$   $\gamma = 0,033\%$ .

Для действующего значения может быть использована эта же формула, только амплитуды и фазы гармоник для подстановки должны

быть определены через амплитуды и фазы гармоник измеряемого напряжения по формуле

$$\overset{*}{a}_k = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \overset{*}{a}_{-l} \overset{*}{a}_{l-k},$$

где  $\overset{*}{a}$  — комплексные амплитуды гармоник. Погрешность от дискретности выражается соотношением  $\gamma_d = \frac{100 K_a K_\Phi}{N_{\text{ном}} \sqrt{n}} \%$  для среднего значения;  $\gamma_d = \frac{100 K_a}{N_{\text{ном}} \sqrt{n}} \%$  для действующего значения, где  $N_{\text{ном}}$  — число уровней измерителя мгновенного значения. Так, если  $N_{\text{ном}} = 200$ ,  $n = 100$ , то при измерении синусоидального напряжения погрешность порядка  $0,07 \%$ .

### ВЫВОДЫ

Для измерения значений напряжений в диапазоне частот  $0,01$ — $1000$  гц возможно создание вольтметра с классом точности  $1,5$  и временем измерения, не превышающим одного периода самой низкой частоты диапазона.

Для измерения средних и действующих значений напряжений в диапазоне частот  $0,01$ — $1000$  гц могут быть созданы приборы, предназначенные для работы в одном из поддиапазонов  $0,01$ — $1$  гц и  $0,5$ — $1000$  гц; для частот  $0,01$ — $1$  гц целесообразно цифровое интегрирование за целое число периодов; точность измерения при этом порядка  $0,1$ — $0,3 \%$ ; для частот  $0,5$ — $1000$  гц целесообразно применение повышенной инерционности и повышенного успокоения показывающего прибора. Время установления при этом может быть порядка  $10$ — $15$  сек при классе точности  $1 \%$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Эссенсон. Измерение напряжений инфранизкого диапазона частот.— Материалы Всесоюзного совещания по измерению напряжений, токов и сопротивлений. Таллин, 1964.
2. Ф. Дейст, Р. Китаи. Цифровые вольтметры для измерения неустановившихся напряжений: принцип действия и точностные характеристики.— Экспресс-информация, КИТ, 1964, № 3.
3. И. Ф. Клисторин, И. И. Коршевер. Измерение интегральных характеристик напряжений методом обработки мгновенных значений.— Автотририя, 1966, № 2.
4. К. А. Нетребенко. Компенсационные схемы амплитудных вольтметров и указателей экстремума. М., «Энергия», 1967.
5. П. П. Орнатский, В. Г. Цывинский. Классификация методов измерения напряжений на инфранизких частотах.— Измерительная техника, 1968, № 9.
6. И. В. Латенко. Аналоговые множительные устройства. Киев, Гостехиздат УССР, 1963.
7. В. Д. Циделко. Исследование и разработка высокочувствительных измерительных частотных преобразователей и интегрирующих цифровых приборов постоянного напряжения и тока. Автореферат канд. дисс. Киев, 1968.

Поступила в редакцию  
7 октября 1968 г.,  
окончательный вариант —  
24 марта 1969 г.