

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

О ПОСТРОЕНИИ ЦИФРОВОГО ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ И ОТНОШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Во многих случаях практики необходимы цифровые измерительные приборы (ЦИП), с помощью которых можно было бы определять различные функциональные связи между интегральными характеристиками периодических сигналов. Сюда относятся в первую очередь ЦИП для измерения отношения эффективных значений напряжений (токов) и ЦИП для измерения полной мощности [1, 2].

Для определения полной мощности и отношения двух напряжений необходимо осуществить операции умножения и деления. Эти операции могут быть выполнены над кодами действующих значений тока и напряжения, полученными отдельно. Однако в этом случае ЦИП получается сложным.

В настоящей статье рассматриваются структурные схемы и даются некоторые рекомендации к построению ЦИП на принципе формирования опорного напряжения для измерения полной мощности и отношения эффективных значений периодических напряжений, в которых результат измерения получается в цифровой форме без промежуточного преобразования исходных сигналов.

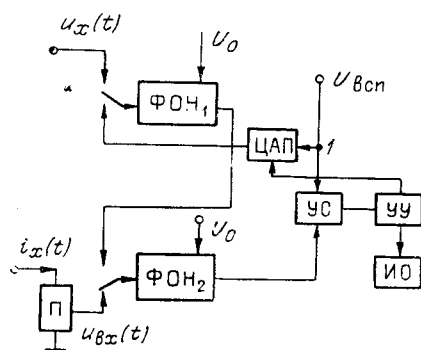


Рис. 1.

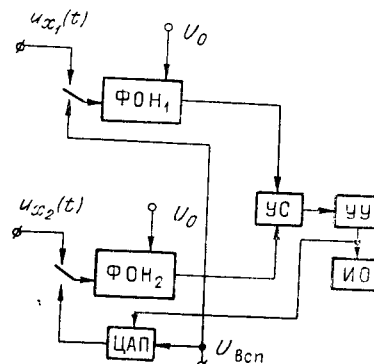


Рис. 2.

Принцип работы ЦИП для измерения полной мощности можно пояснить структурной схемой, приведенной на рис. 1 [3]. На первом этапе измерения вход устройства формирования опорного напряжения (ФОН₁) подключен к источнику напряжения $u_x(t)$, а вход устройства ФОН₂ — к выходу линейного преобразователя измеряемого тока $i_x(t)$ в напряжение, т. е. входное напряжение ФОН₂ $u_{вх_2}(t)$ определяется равенством

$$u_{вх_2}(t) = k i_x(t), \quad (1)$$

где k — постоянный коэффициент.

Устройство ФОН преобразует входное напряжение $u_{вх}(t)$ (при любом его уровне в пределах заданного диапазона) в переменное опорное напряжение $u_{оп}(t)$, равное по эффективному значению образцовому U_0 и совпадающее по форме с входным [4]. По окончании времени формирования между эффективным значением напряжения $u_x(t)$ и коэффициентом передачи устройства ФОН₁ устанавливается следующее соотношение:

$$U_{x_1} = \frac{U_0}{K_{п1}}, \quad (2)$$

где $K_{п1}$ — установившееся значение коэффициента передачи устройства ФОН₁. Аналогичное соотношение можно записать и для ФОН₂:

$$k I_x = \frac{U_0}{K_{п2}}, \quad (3)$$

где $K_{п2}$ — установившееся значение коэффициента передачи устройства ФОН₂. По окончании формирования опорного напряжения коэффициенты передачи $K_{п1}$ и $K_{п2}$ запоминаются с помощью запоминающих элементов.

Для полной мощности, учитывая (2) и (3), можно записать уравнение

$$P = U_x I_x = \frac{U_0^2}{k} \frac{1}{K_{п1} K_{п2}}. \quad (4)$$

Здесь P — полная мощность; U_x, I_x — эффективные значения напряжения и тока.

Как видно из выражения (4), для определения полной мощности достаточно определить величину $1/K_{п1}K_{п2}$. В рассматриваемой схеме для этой цели используется компенсационная цепь*, в которую входят цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), устройства ФОН₁ и ФОН₂, устройство сравнения (УС), устройство управления (УУ). При уравновешивании в компенсационную цепь вводится вспомогательное напряжение $U_{всп}$, например прямоугольной формы, частота которого выбирается исходя из полосы пропускания ЦАП и устройств ФОН. Результат измерения в цифровой форме выводится на индикатор отсчета (ИО).

Состоянию равновесия этой компенсационной цепи соответствует соотношение

$$U_{всп} j \alpha \bar{N} K_{п1} K_{п2} - U_{всп} \leq \Delta U. \quad (5)$$

Здесь j — коэффициент пропорциональности, учитывающий основание системы счисления a , в которой производится вывод на ИО, и число разрядов n , т. е. $j = a^{-n}$; \bar{N} — код результата измерения; α — коэффициент передачи ЦАП; ΔU — абсолютная величина напряжения некомпенсации на входе УС.

* Как и в [4], здесь также, помимо компенсационного метода, можно применить любой известный метод определения коэффициента передачи четырехполюсников.

Учитывая выражение (4), можно записать соотношение между полной мощностью P и цифровым отсчетом

$$P = \frac{U_0^2 j \alpha}{k} (\bar{N} \pm \frac{\Delta U}{U_{\text{всп}}} \bar{N}), \quad (6)$$

где $\frac{U_0^2 j \alpha}{k} = q$ — единица дискретности по мощности (квант), а $\frac{\Delta U}{U_{\text{всп}}} \bar{N} = \frac{1}{2}$. Последнее выражение позволяет найти абсолютную величину напряжения некомпенсации на входе УС

$$\Delta U = \frac{U_{\text{всп}}}{2\bar{N}}. \quad (7)$$

Соотношение (7) показывает, что величина напряжения на входе УС обратно пропорциональна числу \bar{N} (при измерении на одном и том же пределе). Это обстоятельство позволяет построить ЦИП с постоянной по шкале относительной погрешностью от дискретности.

Из уравнения (6) следует также, что отсчет измеряемой мощности практически не зависит от величины вспомогательного напряжения, а значит, и от его нестабильности. Важным преимуществом рассматриваемой структуры ЦИП, как и вольтметра, описанного в [4], является то, что на входе устройства ФОН₁ могут использоваться непрецизионные усилители и делители для расширения пределов измерения по напряжению.

Если для преобразования измеряемого тока $i_x(t)$ в напряжение $u_{\text{вх}_2}(t)$ использовать резистор, включенный в цепь тока, то коэффициент преобразования будет равен сопротивлению резистора R . В этом случае выражение для q примет вид

$$q = \frac{U_0^2 j \alpha}{R}. \quad (8)$$

Попробуем оценить минимальную величину дискретности по мощности q , достижимую уже в настоящее время. В автоматическом цифровом вольтметре [2, 5] минимальная величина дискретности равна 100 мкА. Следовательно, для ваттметра реальными величинами чувствительности по напряжению и току будет соответственно 100 мкВ и 100 мкА при сопротивлении шунта $R=1$ Ом, а это значит, что в ЦИП можно получить весьма высокую чувствительность по мощности порядка 10^{-7} — 10^{-9} Вт. Если записать выражение (4) через диапазон d входных напряжений устройства ФОН и через минимальные величины измеряемого тока и напряжения на данном пределе, т. е. $P = K I_{x\text{min}} d U_{x\text{min}} d$, то минимальная измеряемая мощность пропорциональна d^2 . Таким образом, диапазон измерения мощности 10^4 , так как диапазон устройства ФОН, по данным [4], может составлять 10^2 .

Величина $U_{\text{всп}}$ должна выбираться из условия, что при уравновешивании компенсационной цепи это напряжение не должно ограничиваться усилителем устройства ФОН. Принимая во внимание то, что усилитель может передавать (с заданными нелинейными искажениями) сигналы с определенным коэффициентом амплитуды K_a , и учитывая выражения (2) и (3), для величины напряжения $U_{\text{всп}}$ можно записать соотношение

$$U_{\text{всп}} \leq \frac{U_{x\text{max}} k I_{x\text{max}} K_a}{\beta U_0},$$

где K_a — коэффициент амплитуды (отношение максимального значения амплитуды напряжения к его эффективному значению); β — максимальный весовой коэффициент ЦАП. При минимальном входном напряжении и токе на данном пределе измерения, учитывая диапазон изменения коэффициента усиления усилителя устройства ФОН d , величину $U_{всп}$ можно определить так:

$$U_{всп} \leq \frac{U_{x\max} k I_{\max} K_a}{d^2 \beta U_0}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что величина напряжения $U_{всп}$ должна уменьшаться при снижении входных токов и напряжений. Для того чтобы не происходило ограничений сигнала $U_{всп}$ при измерении малых напряжений, можно, например, уравнивание начинать с младших декад [4].

Используя выражение (6), можно найти относительную погрешность измерения полной мощности, т. е.

$$\delta_p = 2\delta U_0 + \delta_x - \delta_k. \quad (10)$$

Первое слагаемое в этом выражении учитывает нестабильность опорного напряжения U_0 , погрешность устройства формирования опорного напряжения и погрешность запоминания коэффициента передачи. Слагаемое δ_x определяется неточностью подгонки и нестабильностью элементов ЦАП. Третий член δ_k учитывает погрешность преобразования измеряемого тока $i_x(t)$ в напряжение $u_{вх_2}(t)$. Эта погрешность будет весьма малой, если использовать низкоомные резисторы.

Учитывая погрешность от дискретности, общую погрешность измерения можно записать в виде

$$\delta = \pm \delta_p \pm \frac{1}{2N}.$$

Остановимся теперь на структуре ЦИП для измерения отношения эффективных значений периодических напряжений (рис. 2). Его схема отличается от схемы ЦИП для измерения полной мощности только компенсационной цепью. На вход устройства ФОН₁ подается измеряемое напряжение $u_{x1}(t)$, а на вход ФОН₂ $u_{x2}(t)$.

По окончании времени формирования переменного опорного напряжения $u_{оп}(t)$ между коэффициентом передачи $K_{п1}$ устройства ФОН₁ и входным напряжением $u_{x1}(t)$ устанавливается следующая связь:

$$U_{x1} = \frac{U_0}{K_{п1}}. \quad (11)$$

Аналогичное соотношение можно записать и для устройства ФОН₂:

$$U_{x2} = \frac{U_0}{K_{п2}}. \quad (12)$$

С учетом (11) и (12)

$$\frac{U_{x2}}{U_{x1}} = \frac{K_{п1}}{K_{п2}}. \quad (13)$$

Для измерения и преобразования в цифровую форму отношения коэффициентов передачи $K_{п1}$ и $K_{п2}$ замыкается компенсационная цепь. Результат измерения выводится в цифровой форме на индикатор отсчета ИО.

Условие равновесия компенсационной цепи имеет вид

$$U_{всп} j\alpha \bar{N} K_{п2} - U_{всп} K_{п1} \leq \Delta U, \quad (14)$$

где приняты такие же обозначения, как и в выражении (5). С учетом (13) и (14)

$$\frac{U_{x2}}{U_{x1}} = j\alpha \left(\bar{N} \pm \frac{\Delta U U_{x1} \bar{N}}{U_0 U_{\text{всп}}} \right), \quad (15)$$

где $j\alpha = q$ — величина кванта, а $\frac{\Delta U U_{x1} \bar{N}}{U_0 U_{\text{всп}}} = \frac{1}{2}$. Отсюда можно найти абсолютную величину напряжения некомпенсации, приведенную к входу устройства сравнения:

$$\Delta U = \frac{U_0 U_{\text{всп}}}{2 U_{x1} \bar{N}}. \quad (16)$$

Из (15) следует, что относительная погрешность измерения отношения эффективных значений напряжения δ в основном определяется нестабильностью коэффициента α , т. е. δ_x не зависит от величины нестабильности опорного напряжения U_0 и вспомогательного напряжения $U_{\text{всп}}$. Это обстоятельство позволяет исключить из ЦИП источник образцового напряжения, а для калибровки устройства ФОН воспользоваться напряжением $U_{\text{всп}}$, к стабильности которого не предъявляется жестких требований. Выражение (16) показывает, что абсолютная величина напряжения компенсации ΔU на входе устройства сравнения обратно пропорциональна числу \bar{N} и действующему значению измеряемого напряжения U_{x1} . В связи с этим при постоянном напряжении U_{x1} можно построить прибор с равномерной по шкале относительной погрешностью.

То обстоятельство, что погрешность измерения не зависит от величины вспомогательного напряжения $U_{\text{всп}}$, а величина напряжения ΔU пропорциональна ему, стимулирует выбор величины $U_{\text{всп}}$ возможно большей. Однако в данном случае $U_{\text{всп}}$ не может выбираться больше $U_{x1\text{min}} K_a$ из-за ограничений в устройстве ФОН₁.

Таким образом, величина напряжения некомпенсации ΔU будет наименьшей при $U_{x1\text{min}}$ и $\bar{N} = \bar{N}_{\text{max}}$, т. е.

$$\Delta U_{\text{min}} = \frac{U_0 U_{x1\text{min}} K_a}{2 U_{x1\text{max}} \bar{N}_{\text{max}}}. \quad (17)$$

Из (17) следует, что для упрощения требований к устройству сравнения необходимо выбирать отношение $U_{x1\text{min}}/U_{x1\text{max}}$ возможно меньшим или устройство ФОН выполнить так, чтобы его усилитель обеспечивал усиление больших сигналов без ограничения.

На устройство ФОН₂ это требование не распространяется, так как сигнал в нем не будет ограничиваться, если уравнивание компенсационной цепи начинать с одной из младших декад [4]. Это же условие распространяется и на ЦИП для измерения мощности.

Время измерения $t_{\text{изм}}$ для рассмотренных ЦИП складывается из времени формирования $t_{\text{ф}}$ и времени измерения коэффициента передачи t . Время t определяется временем уравнивания компенсационной цепи и может быть сделано достаточно малым (порядка десятка миллисекунд) [6]. Это оказывается выгодным также и потому, что уменьшится погрешность от запоминания коэффициента передачи ФОН. Время формирования переменного опорного напряжения $t_{\text{ф}}$ зависит от динамических характеристик устройств ФОН и составляет величину порядка 1 с [5, 6].

В заключение следует отметить, что схемы ЦИП для измерения полной мощности и отношения эффективных значений периодических

напряжений отличаются только соединением в компенсационной цепи, поэтому представляется возможным (имея два идентичных устройства ФОН) реализовать универсальный ЦИП для измерения полной мощности, отношения эффективных значений периодических напряжений, эффективных значений напряжений и токов, а также постоянных напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарубежные цифровые электронизмерительные приборы.— Обзор зарубежной литературы за 1966—1967 гг. М., ЦНИИТЭИ, 1968.
2. А. М. Шрамков. Измерение коэффициента мощности многофазной системы.— Доклады Львовского политехнического института, т. III, вып. 1 и 2 (Электротехника). Львов, МВО УССР, 1958.
3. В. М. Белов, И. Ф. Клисторин, А. Е. Подзин. Автоматический цифровой ваттметр. Авторское свидетельство № 245910. — ОИПОТЗ, 1969, № 20.
4. В. М. Белов, И. Ф. Клисторин, А. Е. Подзин. Принцип построения универсального автоматического цифрового вольтметра.— Автометрия, 1969, № 2.
5. В. М. Белов, В. А. Буровцев, И. Ф. Клисторин, А. Е. Подзин. Устройство формирования периодических опорных напряжений.— Труды семинара «Методы и средства аналого-цифрового преобразования». Новосибирск, «Наука», 1971.
6. В. М. Белов, В. А. Буровцев, И. Ф. Клисторин, А. Е. Подзин, Г. М. Собстель. Цифровой вольтметр переменного и постоянного тока.— Автометрия, 1971, № 5.

*Поступила в редакцию
8 сентября 1971 г.*