

## ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 621.317.77(088.8)

В. И. СКРИПНИК, Ю. А. СКРИПНИК  
 (Киев)

### ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ, ВНОСИМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКАМИ

Для измерения фазовых сдвигов, вносимых различными четырехполюсниками (трансформаторами, усилителями, фильтрами и т. п.) на высоких частотах, наиболее удобным является использование электронных фазометров с цифровым отсчетом. Обычно в электронных фазометрах фазовый сдвиг, вносимый контролируруемыми четырехполюсниками на высокой частоте, вначале переносится на напряжение низкой фиксированной частоты путем супергетеродинного преобразования [1], а затем преобразуется в длительность прямоугольных импульсов, которые кодируются короткими импульсами и подсчитываются счетчиком импульсов [2].

В результате последовательных преобразований возникает значительная погрешность, достигающая, например, в серийно выпускаемых фазометрах с цифровым отсчетом типа Ф2-4,  $1-1,5^\circ$  в диапазоне частот свыше 50 кГц. Эту погрешность можно уменьшить, осуществляя непосредственное преобразование фазового сдвига в частоту, которую можно с высокой точностью измерить цифровым частотомером. Для этой цели применяются измерительные схемы с контуром самовозбуждения [3], состоящим из исследуемого четырехполюсника (ИЧ) (рис. 1), усилителя ( $У_\omega$ ) и цепи положительной обратной связи (ПОС) (ключ К в верхнем положении). Если ИЧ обладает усилительными свойствами, то усилитель  $У_\omega$  в контуре самовозбуждения может и отсутствовать. Возникновение автоколебаний на какой-либо частоте  $f_c$  связано с выполнением условия баланса фаз в замкнутом контуре

$$\psi_{42}(f_c) + \psi_{54}(f_c) + \psi_{51}(f_c) = 2\pi m, \quad (1)$$

где  $\psi_{42}(f_c)$ ,  $\psi_{54}(f_c)$ ,  $\psi_{51}(f_c)$  — фазовые сдвиги, вносимые на частоте  $f_c$  четырехполюсником ИЧ, усилителем  $У_\omega$  и цепью обратной связи соответственно;  $m$  — число полных оборотов фазы для частоты самовозбуждения.

Для режима установившихся гармонических колебаний должно выполняться и условие баланса амплитуд

$$k_{42}(f_c) k_{54}(f_c) k_{51}(f_c) = 1. \quad (2)$$

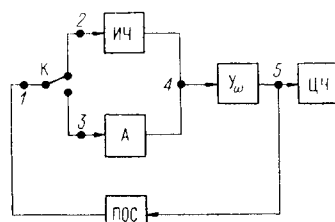


Рис. 1.

где  $k_{42}(f_c)$ ,  $k_{54}(f_c)$  и  $k_{51}(f_c)$  — коэффициенты передачи (усиления) звеньев контура самовозбуждения на частоте  $f_c$ .

Из выражения (1) по известному  $m$  и вносимому цепью обратной связи и усилителем фазовому сдвигу можно определить измеряемый фазовый сдвиг

$$\psi_{42} = 2\pi m - (\psi_{51} + \psi_{54}). \quad (3)$$

При  $m=0$  и использовании широкополосного усилителя ( $\psi_{54} \approx 0$ ) имеем

$$\psi_{42} = -\psi_{51}. \quad (4)$$

Если в контур самовозбуждения включить фазонесдвигающий аттенуатор А (ключ К в нижнем положении) с коэффициентом передачи, равным коэффициенту передачи ИЧ ( $k_{42} = k_{43}$ ), то частота автоколебаний изменится на величину  $\Delta f_c$  вследствие изменения только баланса фаз. При этом величина вносимого фазового сдвига  $\psi_{42}$  может быть определена как

$$\psi_{42} \left( \frac{\partial \psi_{51}}{\partial f_c} \right) \Delta f_c, \quad (5)$$

где  $\frac{\partial \psi_{51}}{\partial f_c}$  — крутизна фазочастотной характеристики частотнозависимого элемента (ПОС).

Измерив значения частоты самовозбуждения при двух положениях ключа К цифровым частотомером (ЦЧ), можно по формуле (5) оценить вносимый фазовый сдвиг  $\psi_{42}$ .

Однако практически фазочастотная характеристика RC- или LC-цепочек, применяемых в схемах с самовозбуждением, не является линейной. Например, для LC-контура крутизна фазочастотной характеристики равна [4]

$$\frac{\partial \varphi_{o.c}}{\partial f_c} = 2 \left( \frac{Q}{f_0} \right) \cos^2 \varphi, \quad (6)$$

где  $Q$  — добротность контура;  $f_0$  — частота настройки.

Кроме того, фазовый сдвиг, вносимый ИЧ, также зависит от частоты автоколебаний. Например, чем больше фазовый угол, тем больше изменение частоты самовозбуждения, а следовательно, и больше изменения самого угла. Поэтому построить цифровой измеритель фазовых сдвигов, используя схему с самовозбуждением, не представляется возможным.

Необходимым условием создания цифрового фазометра является линейризация функции преобразования фазового сдвига в частоту. Покажем, что эта задача решается применением синхронизируемых схем с самовозбуждением в сочетании с автоматической обработкой результатов двух измерений частоты автоколебаний (рис. 2).

Синхронизирующий генератор  $\Gamma_\omega$  частоты  $f_1$  через электронный ключ К, управляемый генератором тактовых импульсов  $\Gamma_2$  посредством схемы управления (распределителя импульсов) (СУ), подключен к автоматическому переключателю (АП) контура с самовозбуждением. Контур с самовозбуждением включает фазонесдвигающий аттенуатор А и исследуемый четырехполюсник ИЧ, подключенные к выходам автоматического переключателя АП, также управляемого импульсами схемы управления СУ. Выходы аттенуатора А и исследуемого четырехполюсника ИЧ соединены через широкополосный усилитель  $У_\omega$  с линией задержки (ЛЗ), выход которой подключен ко входу автоматического переключателя АП. Время, в течение которого замкнут ключ К, выбирается из условия

возбуждения в контуре самовозбуждения автоколебаний с частотой, близкой к частоте синхронизирующего генератора  $\Gamma_{\omega}$ .

В первый такт работы автоматического переключателя АП при включении в контур с самовозбуждением фазонесдвигающего аттенюатора А с коэффициентом передачи, равным коэффициенту передачи исследуемого четырехполюсника ИЧ; в нем после размыкания ключа К устанавливаются автоколебания, частота  $f'_6$  которых зависит от фазового сдвига  $\psi_{26}$ , вносимого линией задержки ЛЗ. В этом случае  $\psi_{54}=0$ ;

$$\psi_{26}(f'_6) = 2\pi m = 2\pi f'_6 \tau_{26}, \quad (7)$$

где  $\tau_{26}$  — время задержки ЛЗ.

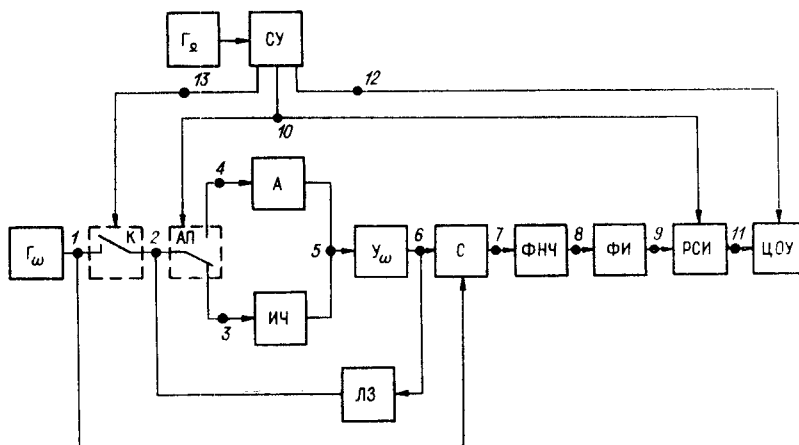


Рис. 2.

Частота автоколебаний из (7) без учета фазового сдвига, вносимого усилителем  $У_{\omega}$ , равна

$$f'_6 = \frac{m}{\tau_{26}} \approx f_1. \quad (8)$$

Во второй такт работы АП при включении в контур с самовозбуждением исследуемого четырехполюсника ИЧ  $\psi_{53} \neq 0$  и баланс фаз определяется

$$\psi_{53} = (f_6'') + 2\pi f_6'' \tau_{26} = 2\pi m, \quad (9)$$

где  $f_6''$  — частота автоколебаний контура при включении ИЧ. Отсюда при  $\tau_{26} = \frac{m}{f_6'}$  получаем

$$\psi_{53}(f_6'') = \frac{2\pi m}{f_6'} (f_6' - f_6''). \quad (10)$$

Напряжение с выхода усилителя  $У_{\omega}$  контура поступает на один вход смесителя С, на второй вход которого поступает напряжение от синхронизирующего генератора  $\Gamma_{\omega}$  частоты  $f_1 \cong f_6'$ . На выходе фильтра нижних

частот (ФНЧ) выделяется напряжение разностной частоты, значение  $f_8$  которой для одного положения автоматического переключателя АП

$$f_8' = f_1 - f_6' = f_1 - \frac{m}{\tau_{2\phi}}, \quad (11)$$

а значение  $f_8''$  для другого положения переключателя АП

$$f_8'' = f_1 - f_6'' = f_1 - \left(1 - \frac{\psi_{53}(f_6'')}{2\pi m}\right) \frac{m}{\tau_{2\phi}}. \quad (12)$$

Из напряжений низкой частоты формирователем импульсов (ФИ) в моменты перехода напряжения через нуль вырабатываются короткие импульсы, которые поступают на реверсивный счетчик импульсов (РСИ). Так как цепи управления счетчика РСИ и переключателя АП соединены между собой, то в одном положении переключателя АП счетчик работает на «сложение» и насчитывает число импульсов

$$n' = \left(f_1 - \frac{m}{\tau_{2\phi}}\right) \frac{T}{2}, \quad (13)$$

где  $T$  — период коммутации переключателя АП. В другом положении АП счетчик РСИ реверсируется и работает в режиме «вычитание». При этом

$$n'' = \left[f_1 - \left(1 - \frac{\psi_{53}(f_6'')}{2\pi m}\right) \frac{m}{\tau_{2\phi}}\right] \frac{T}{2}. \quad (14)$$

Остаток импульсов, накопленных счетчиком за период коммутации  $T$ , равен

$$N = n'' - n' = \frac{\psi_{53}(f_6'')}{2\pi \tau_{2\phi}} \frac{T}{2}. \quad (15)$$

Цифровой код, соответствующий  $N$  импульсам, индицируется на цифровом отсчетном устройстве (ЦОУ). Таким образом, показание цифрового индикатора пропорционально фазовому сдвигу, вносимому исследуемым четырехполюсником на частоте  $f_6''$ .

Если учесть фазовый сдвиг, вносимый усилителем  $U_\omega$  в оба такта коммутации, то в отличие от (10) имеем

$$\psi_{53}(f_6'') = \frac{2\pi m}{f_6''} (f_6' - f_6'') - \left[ \psi_{65}(f_6'') - \frac{f_6'}{f_6''} \psi_{65}(f_6') \right], \quad (16)$$

где  $\psi_{65}(f_6')$  и  $\psi_{65}(f_6'')$  — фазовые сдвиги, вносимые усилителем при разных частотах самовозбуждения. Поэтому количество импульсов в счетчике за два такта коммутации будет равно

$$N = \frac{\psi_{53}(f_6'') + \left[ \psi_{65}(f_6'') - \psi_{65}(f_6') \right]}{2\pi \tau_{2\phi}} \frac{T}{2}. \quad (17)$$

Для исключения влияния значения частоты самовозбуждения и фазовых сдвигов, вносимых усилителем  $U_\omega$ , на величину измеряемого сдвига фаз время задержки линии выбирается из соотношения

$$\tau_{2\phi} = \frac{m}{f_6'} \approx \frac{m}{f_1}, \quad (18)$$

если  $m \gg 100$ . При этом условии  $\Delta f = f_6' - f_6'' \ll f_1$ , а  $\psi_{53}(f_6') \approx \psi_{53}(f_6'') \approx \psi_{53}(f_1)$  практически не зависит от изменений частоты автоколебаний. При малых девиациях частоты автоколебаний  $\Delta f$  и пологой фазовой характеристике широкополосного усилителя  $Y_\omega$  можно также считать, что  $\psi_{65}(f_6') \approx \psi_{65}(f_6'')$ . Тогда с учетом соотношения (18) имеем

$$N = \frac{f_1 T}{2m} \left[ \frac{\psi_{53}(f_1)}{2\pi} \right], \quad (19)$$

где  $\psi_{53}(f_1)$  — фазовый сдвиг четырехполюсника на частоте  $f_1$ .

Следовательно, показания фазометра при рекомендованных режимах зависят только от величины фазового сдвига исследуемого четырехполюсника на выбранной частоте. Так, при использовании ферритовой линии задержки с  $\tau = 10$  мксек и частоте возбуждения  $f_1 = 10$  МГц ( $m = 100$ ) изменения фазового сдвига, вносимого исследуемым четырехполюсником (например, трансформаторным делителем напряжения), в пределах  $0-45^\circ$  вызывали линейные изменения частоты самовозбуждения не более чем на  $1-1,5\%$ . При этом мультипликативная погрешность измерения фазового сдвига не превышает  $0,2-0,3\%$  и определяется в основном нестабильностью параметров линии задержки. Точность измерения можно повысить при использовании кварцевой линии задержки.

Для получения цифрового отсчета непосредственно в электрических градусах необходимо время счета  $T$  в соответствии с выражением (19) выбирать, исходя из значения частоты синхронизирующего напряжения  $f_1$ . Если частота  $f_1$  выбрана, то из (19) получим

$$T = \frac{2m}{f_1} \left( \frac{2\pi}{\Delta\psi} \right), \quad (20)$$

где  $\Delta\psi$  — единица младшего разряда в радианах.

Для приведенного выше примера и разрешающей способности фазометра в  $0,1^\circ$  ( $\Delta\psi = \frac{2\pi}{3600}$ ) время счета составляет  $T = 0,078$  сек. Если учесть необходимость запираания счетчика на время переходных процессов в контуре самовозбуждения при переключении [5], то время одного измерения будет порядка  $0,1-0,2$  сек.

Таким образом, синхронизация автоколебаний генератором гармонических колебаний перед началом измерения, осуществляемая кратковременным замыканием ключа  $K$ , исключает возможность самовозбуждения контура при значениях  $m$ , отличных от выбранного. Введение в схему смесителя  $C$  позволяет измерять малые девиации частоты и уменьшить тем самым емкость реверсивного счетчика импульсов. В результате обеспечивается достаточно высокая точность измерения фазовых сдвигов, вносимых электрическими четырехполюсниками, стабильность цифрового отсчета и относительно малое время измерения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Вишнячук, А. Ф. Котюк, Л. Я. Минзюк. Электромеханические и электронные фазометры. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
2. Э. И. Вологдин. Повышение точности преобразования временных интервалов в цифровой код методом корреляционного усреднения.— Автотметрия, 1969, № 2.
3. В. А. Двинских. Измерение параметров усилителей с применением режима самовозбуждения. М., «Советское радио», 1965.
4. В. А. Двинских. Измерительные схемы с самовозбуждением. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
5. Ю. А. Скрипник. Влияние переходных процессов на точность одноканального дифференциального указателя.— Автотметрия, 1966, № 3.

Поступила в редакцию  
20 марта 1970 г.