

В. П. КАШЛЕВ

(Киев)

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ФАЗОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Описана схема автоматического фазометра, использующего устройство, переносящее частоту. Широкополосность достигается благодаря применению цепей с логарифмическими фазочастотными характеристиками.

Для ускорения процессов измерения в условиях производства необходимо непосредственное наблюдение и быстрое измерение фазочастотных характеристик различных четырехполюсников, поэтому разработка автоматических характериографов является актуальной задачей измерительной техники.

Автоматические фазометры для этих целей чаще строятся на основе применения двухчастотного генератора качающейся частоты (ГКЧ).

Постоянную разность между частотами двух напряжений обычно получают двумя способами: автоподстройкой частоты гетеродина и многократным преобразованием частоты с выделением сигнала разностной частоты двух вспомогательных кварцевых генераторов [1].

Первый способ широко используется в фазометрии при измерении на фиксированных частотах [2], но не находит применения в автомати-

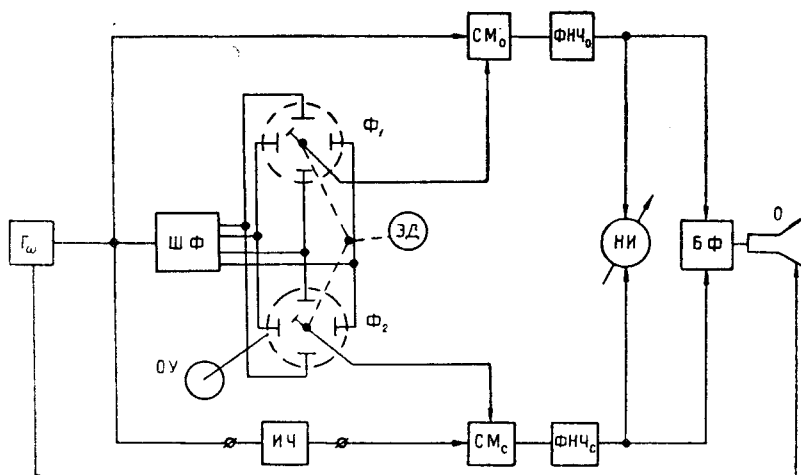


Рис. 1.

ческих фазометрах из-за затруднений, возникающих при синхронной перестройке двух генераторов в широком диапазоне частот.

К недостаткам схем, реализующих второй способ, относятся:

а) трудность получения контролируемой малой девиации частоты (порядка десятых долей процента), так как диапазон рабочих частот свип-генератора, входящего в состав двухчастотного ГКЧ, лежит в значительно более высокочастотной области, чем диапазон частот измеряемых сигналов;

б) невозможность использования стандартных свип-генераторов в диапазоне рабочих частот;

в) зависимость стабильности промежуточной частоты от взаимной стабильности двух генераторов, входящих в состав схемы.

Рассмотрим схему, в которой в качестве гетеродинного напряжения использован один из входных сигналов, смещенных по частоте, и которая свободна от перечисленных недостатков. Схема фазометра (рис. 1) состоит из генератора качающейся частоты Γ_{ω} , широкополосного квадратурного фазовращателя ШФ, двух емкостных четырехкватратных фазовращателей Φ_1 и Φ_2 , питаемых параллельно, смесителей $СМ_0$ и $СМ_с$ с фильтрами нижних частот $ФНЧ_0$ и $ФНЧ_с$ соответственно, фазо-

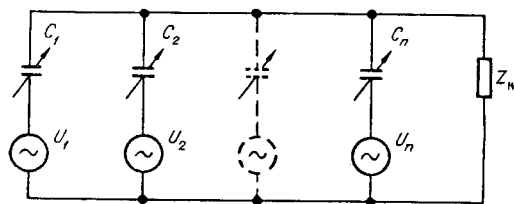


Рис. 2.

чувствительного нуль-индикатора НИ и быстродействующего фазометра БФ с осциллографическим индикатором О, управляемым генератором качающейся частоты. Исследуемый четырехполюсник ИЧ включается в одно из плеч схемы. Конструктивно блок фазовращателей выполнен таким

образом, что статорная система одного из фазовращателей может быть повернута относительно другой, а угол ее поворота может быть определен с помощью отсчетного устройства ОУ. Вал фазовращателей приводится во вращение электродвигателем ЭД.

Для уяснения работы устройства рассмотрим эквивалентную схему n -фазного емкостного фазовращателя (рис. 2).

Питающие фазовращатель напряжения U_1, U_2, \dots, U_n равны по амплитуде и сдвинуты по фазе относительно друг друга на равные углы:

$$\begin{aligned} U_1 &= U \sin \omega t; \\ U_2 &= U \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{n} \right); \\ &\dots \dots \dots \\ U_n &= U \sin \left[\omega t + (n-1) \frac{2\pi}{n} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

а емкости C_1, C_2, \dots, C_n изменяются по закону:

$$\begin{aligned} C_1 &= C_0 + C \sin \varphi; \\ C_2 &= C_0 + C \sin \left(\varphi + \frac{2\pi}{n} \right); \\ &\dots \dots \dots \\ C_n &= C_0 + C \sin \left[\varphi + (n-1) \frac{2\pi}{n} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где C_0 — постоянная составляющая емкости квадранта;
 C — переменная составляющая емкости;

$$\frac{C}{C_0} = m < 1 \quad [1, 3].$$

Если ротор фазовращателя вращается с постоянной угловой скоростью Ω , выражения для емкости можно записать так:

$$\begin{aligned} C_1 &= C_0 [1 + m \sin(\Omega t + \varphi)]; \\ C_2 &= C_0 \left[1 + m \sin \left(\Omega t + \varphi + \frac{2\pi}{n} \right) \right]; \\ &\dots \dots \dots \\ C_n &= C_0 \left\{ 1 + m \sin \left[\Omega t + \varphi + (n-1) \frac{2\pi}{n} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Учитывая, что

$$I_n = \frac{U_n}{Z_n}, \quad (4)$$

найдем

$$\begin{aligned} I_n &= \sum_{k=1}^n (U_i - U_n) j \omega C_i = \sum_{k=1}^n \left\{ U_n \sin \left[\omega t + (k-1) \frac{2\pi}{n} \right] - U_n \right\} \times \\ &\quad \times j \omega C_0 \left\{ 1 + m \sin \left[\Omega t + \varphi + (k-1) \frac{2\pi}{n} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

После тригонометрических преобразований получим

$$\begin{aligned} I_n &= \sum_{k=1}^n \left\{ U_n \sin \left[\omega t + (k-1) \frac{2\pi}{n} \right] j \omega C_0 - U_n j \omega C_0 \right\} + \\ &\quad + \sum_{k=1}^n U_n \sin \left[\omega t + (k-1) \frac{2\pi}{n} \right] j \omega C_0 m \sin \left[\Omega t + \right. \\ &\quad \left. + \varphi + (k-1) \frac{2\pi}{n} \right] - \sum_{k=1}^n U_n j \omega C_0 m \sin \left[\Omega t + \varphi + (k-1) \frac{2\pi}{n} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

При $n > 2$ многофазная система напряжений образует замкнутый многоугольник, поэтому сумма мгновенных значений напряжений, представленная первым и вторым слагаемыми выражения (6), равна нулю. После преобразования второго слагаемого суммы (6) выражение для тока в нагрузке можно представить в виде

$$\begin{aligned} I_n &= \frac{1}{2} m j \omega C_0 \sum_{k=1}^n U_n \cos [(\omega - \Omega) t - \varphi] + \frac{1}{2} m j \omega C_0 \sum_{k=1}^n U_n \cos \left[(\omega + \right. \\ &\quad \left. + \Omega) t + 2(k-1) \frac{2\pi}{n} \right] - n j \omega C_0 U_n. \end{aligned} \quad (7)$$

Второе слагаемое в уравнении (7) по указанной выше причине тоже равно нулю [4, 5].

Подставим (7) в (4) и решим уравнение относительно U_n :

$$U_n = \frac{\frac{n}{2} C_0 m}{\frac{1}{j \omega Z_n} + n C_0} U \cos [(\omega - \Omega) t - \varphi]. \quad (8)$$

Таким образом, выходное напряжение фазовращателя сдвинуто по частоте относительно системы входных напряжений на величину угловой скорости вращения, а его фаза определяется начальным взаимным расположением ротора и статорных пластин.

Рассмотрим работу фазометра в целом. Генератор Γ_ω вырабатывает напряжение U_ω с переменной частотой. Обозначим мгновенную частоту напряжения U_ω через ω ; тогда

$$u_\omega = U_\omega \sin \omega t. \quad (9)$$

На частоте ω исследуемый четырехполюсник вносит сдвиг φ_x . Представим выходное напряжение четырехполюсника следующим уравнением:

$$U_{\text{вых}} = k U_\omega \sin (\omega t - \varphi_x), \quad (10)$$

где k — модуль коэффициента передачи четырехполюсника.

Покажем, что фазовый сдвиг φ_x переносится на фиксированную частоту Ω и может быть измерен компенсационным способом путем поворота статора одного из фазовращателей.

Широкополосный фазовращатель ШФ образует на выходе четырехфазную систему напряжений U_1, U_2, U_3, U_4 , которая используется для возбуждения двух параллельно включенных емкостных фазовращателей:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_m \sin \omega t; & U_2 &= U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right); \\ U_3 &= U_m \sin (\omega t + \pi); & U_4 &= U_m \sin \left(\omega t + \frac{3\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Фазовый сдвиг, вносимый ШФ, приравниваем нулю, так как он входит в оба канала с одним знаком. Пусть начальный угол между ротором и статорной системой фазовращателя Φ_1 равен φ_1 , а тот же угол для фазовращателя Φ_2 — φ_2 . На основании (8) запишем уравнения выходных напряжений фазовращателей:

$$\begin{aligned} U' &= \frac{2C_0' m'}{\frac{1}{j \omega Z_n'} + 4C_0'} U_m \cos [(\omega - \Omega) t - \varphi_1]; \\ U'' &= \frac{2C_0'' m''}{\frac{1}{j \omega Z_n''} + 4C_0''} U_m \cos [(\omega - \Omega) t - \varphi_2]. \end{aligned} \quad (12)$$

Примем, что характеристики ламп смесителей $СМ_0$ и $СМ_c$ аппроксимируются полиномом второй степени. Можно показать [1], что в анодном токе ламп имеются составляющие комбинационных частот — разностной и суммарной

$$U_c = \frac{2C_0'' m'' a k U_{\text{ВЫХ}}}{\frac{1}{j\omega Z_H''} + 4C_0''} U_m \cos(\Omega t + \varphi_1 - \varphi_x), \quad (13)$$

где a — коэффициент при первом члене аппроксимирующего полинома вида

$$au^2 + bu + c. \quad (14)$$

Если установить статоры в положение, соответствующее $\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$, быстродействующий фазометр БФ с осциллографическим индикатором и развертывающим устройством, синхронизированным с генератором качающейся частоты, позволит наблюдать на экране электронно-лучевой трубки фазочастотную характеристику исследуемого четырехполюсника. Для точного измерения любой ординаты наблюдаемой характеристики (при остановке частоты свип-генератора) используется поворотный статор одного из фазовращателей, соединенный с отсчетным устройством, и фазочувствительный нуль-индикатор НИ.

Чтобы добиться нулевого показания фазочувствительного индикатора, статорную систему фазовращателя Φ_2 нужно установить в положение, соответствующее $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_x$, и произвести отсчет измеряемого фазового угла φ_x по шкале, связанной с поворачиваемым статором.

Конструкция фазометра

Два емкостных фазовращателя представляют собой единый блок с одним валом, приводимым во вращение синхронным электродвигателем через понижающую передачу. Число оборотов вала в минуту выбрано равным 2400, что соответствует промежуточной частоте 40 гц. Питание фазовращателей осуществляется с помощью широкополосных мостовых RC-фазовращателей в комбинации с широкополосными дифференциальными трансформаторами. Диапазон рабочих частот 10 кгц—10 Мгц разбит по 3 поддиапазона: 10—100 кгц; 100 кгц—1,0 Мгц; 1,0—10,0 Мгц.

В качестве смесителей применены импульсно-фазовые детекторы. Фазочувствительным нуль-индикатором служит двухполярный триггерный фазометр, усилители-ограничители которого используются для работы с быстродействующим фазометром, построенным по схеме преобразования фазового угла в амплитуду [1].

З а к л ю ч е н и е

Используя устройства, смещающие частоту колебаний, можно построить фазо-когерентную систему, одним из преимуществ которой является то, что величина и стабильность промежуточной частоты определяются одноименными параметрами только одного низкочастотного генератора.

Формирователь смещенного по частоте сигнала работает в широком диапазоне частот без перестройки и позволяет получить вспомогательное напряжение с постоянным сдвигом частоты относительно входного сигнала.

Использование сдвоенного блока фазовращателей дает возможность совместить в одном узле устройство для смещения частоты и компенсирующий фазовращатель.

Описанная схема проще схем известных устройств того же назначения [1, 7].

Следует также отметить, что сочетание устройства, смещающего частоту колебаний, с узкополосным свип-генератором, позволяет сравнительно просто решить задачу построения двухканального ГКЧ с большой стабильностью разностной частоты в широком диапазоне частот при узких полосах качания.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. И. М. Вишенчук, А. Ф. Котюк, Л. Я. Мизюк. Электромеханические и электронные фазометры. М., Госэнергоиздат, 1962.
2. D. A. Alsberg, D. Seed. A precise Direct Reading Phase and Transmission Measuring System for Video Frequencies.— Bell System Techn. J., 1949, XXVIII, № 2.
3. В. А. Ацюковский. Емкостные дифференциальные датчики перемещения. Библиотека по автоматике. М., Госэнергоиздат, 1960.
4. М. В. Верзунов, И. В. Лобанов, А. М. Семенов. Однополосная модуляция. М., Связьиздат, 1962.
5. Б. Б. Штейн, Н. А. Черняк. Однополосная модуляция с помощью фазовых схем. М., Связьиздат, 1959.
6. W. D. Rietz. Ein Methode zur Messung und oszillographischen Aufzeichnung des Phasenganges für Breitbandige Systemen in Bereich von 0,1 bis 10 *mHz*.— Zeitschrift angew. Physik, 1957 № 9.

*Поступила в редакцию
18 сентября 1965 г.,
окончательный вариант —
1 ноября 1965 г.*