

ELEKTROTECHNIKA A RADIOELEKTRONIKA

К.т.н., доцент Рудык А.В., Рудык В.А.

*Національний університет водного господарства та природопольовання
(Україна, г. Ровно)*

ФАЗОМЕТРЫ С МАСШТАБНО – ВРЕМЕННЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Измерители угла фазового сдвига (УФС) или фазометры используются при измерении времени задержки, вносимого объектами в процессе контроля технологических процессов, при измерении дальности и определении места положения объекта и т.д. УФС между двумя сигналами определяется разностью между их полными фазами: $\Delta\varphi = \arg\{\dot{U}_1(t)\} - \arg\{\dot{U}_2(t)\} = \varphi_1 - \varphi_2$, где $\dot{U}_1(t) = U_{m1} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_1)}$, $\dot{U}_2(t) = U_{m2} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_2)}$ – аналитические (комплексные) сигналы.

Рассмотрим масштабное-временное преобразование (МВП) гармонических сигналов, при котором действие входных сигналов фазометра не ограничено во времени. На рис.1 приведена структурная схема фазометра с МВП гармонических сигналов, в котором вращающийся трансформатор (ВТ) используется для смещения частоты. Фазометр состоит из цепи 90°-ного фазового сдвига 1, ВТ 2 со статорными косинусной 3, синусной 4 и роторной 5 обмотками, электродвигателя 6, преобразователей частоты (ПЧ) 7, 8 и фазоиндикатора 9.

Входные напряжения $U_1(t) = U_{m1} \sin \omega t$ и $U_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi)$ подаются на вторые входы ПЧ 7 и 8. На первые входы ПЧ подаётся опорное напряжение $U_p(t)$ с роторной обмотки 5 ВТ 2. При вращении роторной обмотки 5 электродвигателем 6 с угловой скоростью вращения (УСВ) Ω взаимные индуктивности между статорными и роторной обмотками $M_1(t) = M \cdot e^{j(\Omega t + \pi/2)}$ и $M_2(t) = M \cdot e^{j\Omega t}$. В этом случае суммарный магнитный поток (СМП) статора

$$\Phi_{\Sigma}(t) = -\frac{U_{m1}}{\omega L} \cos \omega t \cdot M e^{j(\Omega t + \pi/2)} - \frac{U_{m1}}{\omega L} \sin \omega t \cdot M e^{j\Omega t} = -j \frac{U_{m1} M}{\omega L} e^{-j(\omega - \Omega)t}, \quad (1)$$

где L – индуктивность статорных обмоток 3 и 4 ВТ 2.

ЭДС, наведённая СМП (1) в роторной обмотке 5, будет иметь вид

$$U_p(t) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{d\Phi_{\Sigma}(t)}{dt} \right\} = -k_{\text{мп}} U_{\text{м1}} \left(1 - \frac{\Omega}{\omega} \right) \cos(\omega - \Omega)t \approx -k_{\text{мп}} U_{\text{м1}} \cos(\omega - \Omega)t, \quad (2)$$

где $k_{\text{тр}} = \frac{M}{L}$ – коэффициент трансформации ВТ 2.

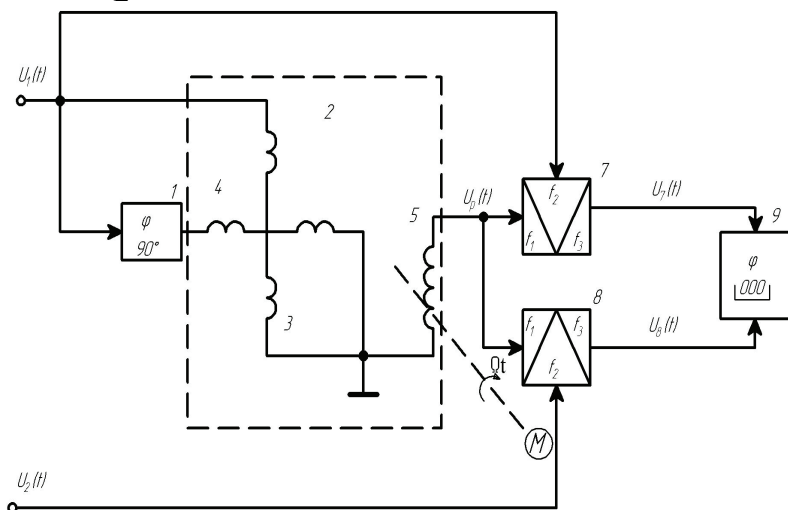


Рисунок 1 – Структурная схема фазометра с МВП гармонических сигналов

Таким образом, на входы ПЧ 7 поступают напряжения $U_1(t)$ и $U_p(t)$, а на входы ПЧ 8 – напряжения $U_2(t)$ и $U_p(t)$, при этом их выходные напряжения:

$$\begin{aligned} U_7(t) &= -0,5 K_7 k_{\text{мп}} U_{\text{м1}}^2 \sin \Omega t; \\ U_8(t) &= -0,5 K_8 k_{\text{мп}} U_{\text{м1}} U_{\text{м2}} \sin(\Omega t + \varphi), \end{aligned} \quad (3)$$

где K_7 и K_8 – коэффициенты передачи преобразователей частоты 7 и 8.

Далее напряжения $U_7(t)$ и $U_8(t)$, частота которых равна УСВ ротора, подаются на фазоиндикатор 9, показания которого пропорциональны УФС между напряжениями $U_1(t)$ и $U_2(t)$, т.е. $\varphi = \varphi$. Преимущество такого преобразования частоты в том, что частота напряжения гетеродина $\omega_1 = \omega - \Omega$ близка по величине к частоте сигнала ω , а $\omega \gg \Omega$. Это позволяет уменьшить погрешность МВП, возникающую за счёт наличия комбинационных составляющих в спектре

тока ПЧ 7 и 8. Однако, если коэффициент передачи цепи 90° -ного фазового сдвига 1 будет отличаться от единицы, то при измерении возникает ошибка:

$$\Delta\varphi = \hat{\varphi} - \varphi = \arctg \frac{\varepsilon \sin 2\varphi}{2(1 + \varepsilon \sin^2 \varphi)}, \quad (4)$$

где $\varepsilon = \frac{U_{m3} - U_{m1}}{U_{m1}}$ – относительное отклонение амплитуды U_{m3} от U_{m1} .

При небольших значениях ε из соотношения (4) при $U_{m3} \neq U_{m1}$ максимальную фазовую погрешность можно определить как $\Delta\varphi_{\max} \approx 0,5\varepsilon$.

Для измерения УФС между двумя гармоническими колебаниями также можно использовать фазометр с МВП, в котором ВТ используется для получения двухканального сигнала с балансной амплитудной модуляцией (рис.2). Фазометр состоит из ВТ 1 с обмотками 2, 3 и 4, электродвигателя 5, ПЧ 6, 7 и 8, цепи 90° -ного фазового сдвига 9, сумматора 10 и фазоиндикатора 11.

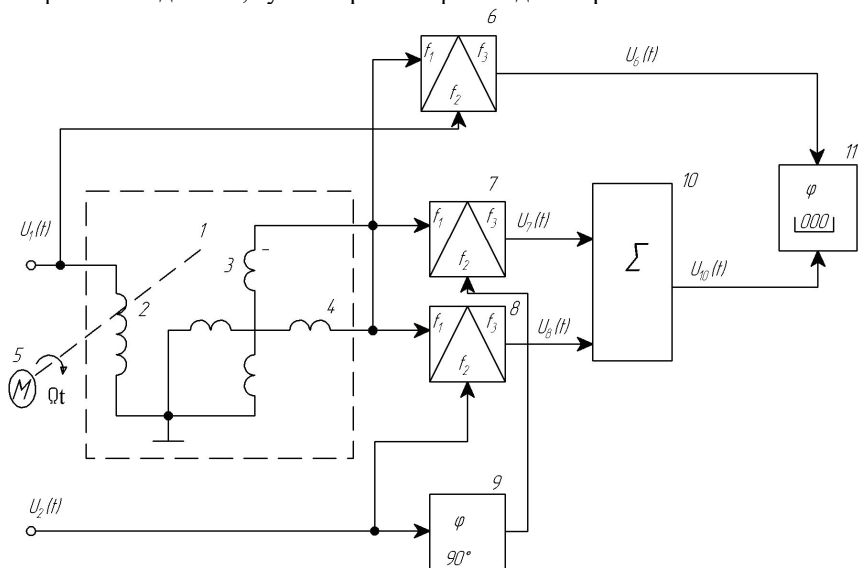


Рисунок 2 – Структурная схема фазометра с МВП гармонических сигналов

Входное гармоническое напряжение $U_1(t) = U_{m1} \sin \omega t$ подаётся на роторную обмотку 2 ВТ 1. При вращении роторной обмотки 2 с УСВ Ω взаимные индуктивности между статорными и роторной обмотками равны $M_3(t) = M e^{j\Omega t}$ и $M_4(t) = M e^{j(\Omega t + \pi/2)}$. В этом случае магнитные потоки статора:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_3(t) &= I_1(t) \dot{M}_3(t) = -\frac{U_{m1} M}{2\omega L_p} \{e^{-j(\omega-\Omega)t} + e^{j(\omega+\Omega)t}\}, \\ \dot{\Phi}_4(t) &= I_2(t) \dot{M}_4(t) = -j \frac{U_{m1} M}{2\omega L_p} \{e^{-j(\omega-\Omega)t} + e^{j(\omega+\Omega)t}\} = j \dot{\Phi}_3(t). \end{aligned} \quad (5)$$

ЭДС, наведенные магнитными потоками (5) в статорных обмотках 3 и 4, при выполнении условия $\omega \gg \Omega$:

$$\begin{aligned} U_3(t) &= 0,5 k_{mp} U_{m1} \{ \sin(\omega - \Omega)t + \sin(\omega + \Omega)t \}; \\ U_4(t) &= 0,5 k_{mp} U_{m1} \{ -\cos(\omega - \Omega)t + \cos(\omega + \Omega)t \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Как видно из (6), ЭДС, наведенные в статорных обмотках 3 и 4 ВТ 1, аналогичны АМ сигналу с подавленной несущей, т.е. ВТ 1 работает в режиме двухканального линейного балансного амплитудного модулятора. Далее напряжения $U_3(t)$ и $U_4(t)$ подаются на первые входы ПЧ 7 и 8, на вторые входы которых подаются напряжение $U_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi)$ и выходное напряжение цепи фазового сдвига 9 $U_9(t) = -K_9 U_{m2} \cos(\omega t + \varphi)$. Выходные напряжения ПЧ 7 и 8:

$$\begin{aligned} U_7(t) &= 0,5 k_{mp} K_7 K_9 U_{m1} U_{m2} \sin \varphi \cos \Omega t; \\ U_8(t) &= -0,5 k_{mp} K_8 U_{m1} U_{m2} \cos \varphi \sin \Omega t, \end{aligned} \quad (7)$$

где K_7 , K_8 и K_9 – коэффициенты передачи ПЧ 7 и 8 и цепи фазового сдвига 9.

При условии $K_7 K_9 = K_8 = K$ напряжение на выходе сумматора 10

$$U_{10}(t) = U_7(t) + U_8(t) = -0,5 k_{mp} K U_{m1} U_{m2} \sin(\Omega t - \varphi). \quad (8)$$

Опорное колебание формируется в ПЧ 6 при подаче напряжений $U_1(t)$ и $U_4(t)$, т.е. $U_6(t) = -0,5 k_{mp} K_6 U_{m1}^2 \sin \Omega t$, где K_6 – коэффициент передачи ПЧ 6.

Далее напряжения в опорном и измерительном каналах $U_6(t)$ и $U_{10}(t)$ подаются на входы фазоиндикатора 11, показания которого пропорциональны УФС между входными напряжениями $U_1(t)$ и $U_2(t)$, т.е. $\hat{\varphi} = \varphi$. Таким образом, в фазометре (рис.2) происходит несмещённая оценка параметра входного сигнала за счёт исключения погрешности измерения УФС из-за возможного неравенства амплитуд входных напряжений. При этом МВП оценивают по отношению $m = \frac{T_{\Omega}}{T_{\omega}} = \frac{\omega}{\Omega}$, величина которого может достигать нескольких тысяч раз.