

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ СХЕМЫ

В. В. ВОЛОДАРСКИЙ, В. К. ЖУКОВ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института
электронной микроскопии)

В настоящее время фазогенераторная схема (ФГС) получает все более широкое распространение в контрольно-измерительной технике. Это обусловлено целым рядом достоинств: высокой чувствительностью, помехоустойчивостью, простотой и, что особенно важно для дефектоскопии, автоматической реализацией принципа самосравнения [1, 2, 3, 4].

В настоящей работе приводятся теоретические и экспериментальные исследования ФГС с взаимно индуктивной связью генераторов.

ФГС изображена на рис. 1, а и состоит из генераторов Γ_1 , Γ_2 с контурами L_1 , C_1 и L_2 , C_2 , связанных через взаимную индуктивность датчиков M . Генераторы работают в режиме «захват».

ФГС можно представить в виде эквивалентной Т-образной схемы замещения, приведенной на рис. 1, б.

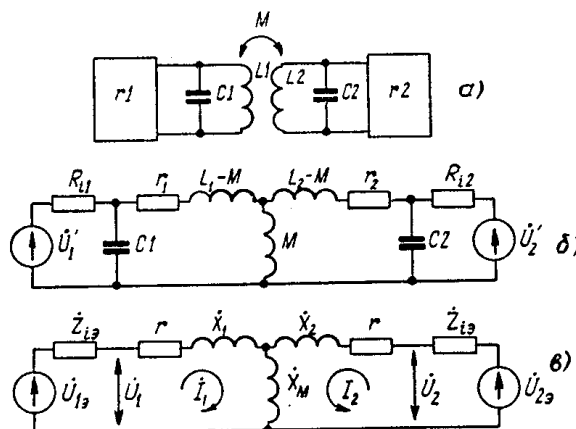


Рис. 1. Фазогенераторная схема (а) и ее эквивалентные схемы замещения (б, в).

Обозначения, принятые на рис. 1, б: \dot{U}_1' , \dot{U}_2' — выходные напряжения генераторов Γ_1 , Γ_2 ; R_{11} , R_{12} — внутренние сопротивления генераторов; r_1 , r_2 — активные сопротивления датчиков.

Вывод аналитической зависимости сдвига фаз между выходными напряжениями генераторов будем производить для случая симметричной индуктивной расстройки в контурах. При этом будем считать, что

индуктивность первого контура увеличивается на величину $\Delta L (L_1 = L + \Delta L)$, а индуктивность второго — уменьшается на $\Delta L (L_2 = L - \Delta L)$. При этом рабочая частота ω ФГС остается неизменной.

Для упрощения анализа будем считать: $R_{11} = R_{12} = R_1$, $r_1 = r_2 = r$, $C_1 = C_2 = C$.

Производя дальнейшие преобразования эквивалентной схемы рис. 1,б, получим схему, изображенную на рис. 1,в. Здесь $\dot{U}_{1э}$, $\dot{U}_{2э}$ — эквивалентные выходные напряжения генераторов; $\dot{Z}_{1э}$ — эквивалентные выходные сопротивления генераторов; \dot{X}_1 , \dot{X}_2 — реактивные сопротивления индуктивно связанных датчиков; \dot{X}_M — сопротивление взаимной индуктивности; I_1 , I_2 — контурные токи; \dot{U}_1 , \dot{U}_2 — напряжения на контурах.

Эквивалентные выходные напряжения и сопротивления генераторов выражаются следующим образом:

$$\dot{U}_{1э} = \dot{U}_1' \frac{\dot{X}_c}{R_i + \dot{X}_c}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_{2э} = \dot{U}_2' \frac{\dot{X}_c}{R_i + \dot{X}_c}, \quad (2)$$

$$\dot{Z}_{1э} = \frac{\dot{X}_c \cdot R_i}{R_i + \dot{X}_c}, \quad (3)$$

где

$$\dot{X}_c = \frac{1}{j\omega C} = -jX_c,$$

Введем обозначение $\eta = \frac{X_c}{R_i}$; для ФГС $\eta \ll 1$, так как $R_i \gg X_c$. Тогда (1) ÷ (3) можно преобразовать:

$$\dot{U}_{1э} = \dot{U}_1' \frac{-jX_c}{R_i - jX_c} = \dot{U}_1' \frac{-j\eta}{1 - j\eta} \approx \dot{U}_1' \eta (\eta - j) \approx \eta e^{j\varphi_э} \dot{U}_1', \quad (4)$$

$$\dot{U}_{2э} \approx \dot{U}_2' \eta (\eta - j) \approx \eta e^{j\varphi_э} \dot{U}_2', \quad (5)$$

$$\dot{Z}_{1э} = \frac{-jX_c R_i}{R_i - jX_c} = \frac{-jX_c}{1 - j\eta} \approx X (\eta - j), \quad (6)$$

где

$$X = \frac{1}{\omega C} \approx \omega L, \quad \varphi_э = -\arctg \frac{1}{\eta}.$$

Упростим выражения реактивных сопротивлений датчиков и взаимной индуктивности.

Взаимная индуктивность $M = k\sqrt{L_1 L_2}$, где k — коэффициент связи датчиков. Введя обозначение $\delta_L = \frac{\Delta L}{L}$ и отбрасывая бесконечно малую второго порядка, получаем

$$M = k \sqrt{(L + \Delta L)(L - \Delta L)} = kL \sqrt{1 - \delta_L^2} \approx kL. \quad (7)$$

Используя выражение (7), получаем

$$\dot{X}_1 = j\omega(L_1 - M) = j\omega(L + \Delta L - kL) = jX(1 + \delta_L - k), \quad (8)$$

$$\dot{X}_2 = jX(1 - \delta_L - k). \quad (9)$$

Выразим эквивалентные выходные напряжения генераторов:

$$\dot{U}_{1э} = [\dot{Z}_{1э} + r + jX_1 + jX_M] I_1 + jX_M I_2, \quad (10)$$

$$\dot{U}_{2э} = [\dot{Z}_{1э} + r + jX_2 + jX_M] I_2 + jX_M I_1. \quad (11)$$

После упрощения имеем

$$\dot{U}_{1\partial} = [\dot{Z}_{1\partial} + r + jX(1 + \delta_L)] I_1 + jkXI_2, \quad (12)$$

$$\dot{U}_{2\partial} = jkXI_1 + [\dot{Z}_{1\partial} + r + jX(1 - \delta_L)] I_2. \quad (13)$$

Значения токов I_1, I_2 определяются выражениями:

$$I_1 = \frac{\dot{U}_{1\partial} - jkXI_2}{\dot{Z}_{1\partial} + r + jX(1 + \delta_L)} = \frac{\dot{U}_{1\partial} - jkXI_2}{\dot{Z} + j\Delta X}, \quad (14)$$

$$I_2 = \frac{\dot{U}_{2\partial} - jkXI_1}{\dot{Z}_{1\partial} + r + jX(1 - \delta_L)} = \frac{\dot{U}_{2\partial} - jkXI_1}{\dot{Z} - j\Delta X}, \quad (15)$$

где $\dot{Z} = \dot{Z}_{1\partial} + r + jX$, $\Delta X = X\delta_L$.

После элементарных преобразований получим окончательные выражения для токов I_1, I_2 :

$$I_1 = \frac{\dot{U}_{1\partial}(\dot{Z} - j\Delta X) - jkX\dot{U}_{2\partial}}{\dot{Z}^2 + (\Delta X)^2 + (kX)^2} = \frac{\dot{U}_{1\partial}(\dot{Z} - j\Delta X) - jkX\dot{U}_{2\partial}}{\dot{F}}, \quad (16)$$

$$I_2 = \frac{\dot{U}_{2\partial}(\dot{Z} + j\Delta X) - jkX\dot{U}_{1\partial}}{\dot{Z}^2 + (\Delta X)^2 + (kX)^2} = \frac{\dot{U}_{2\partial}(\dot{Z} + j\Delta X) - jkX\dot{U}_{1\partial}}{\dot{F}}, \quad (17)$$

где $\dot{F} = \dot{Z}^2 + (\Delta X)^2 + (kX)^2$.

Напряжения на контурах генераторов связаны с выходными эквивалентными напряжениями генераторов следующими соотношениями:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1\partial} - I_1 \dot{Z}_{1\partial}, \quad (18)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{2\partial} - I_2 \dot{Z}_{1\partial}. \quad (19)$$

Отсюда

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{U}_{1\partial} - I_1 \dot{Z}_{1\partial}}{\dot{U}_{2\partial} - I_2 \dot{Z}_{1\partial}} = \frac{\dot{U}_{1\partial} \dot{F} - [\dot{U}_{1\partial}(\dot{Z} - j\Delta X) - jkX\dot{U}_{2\partial}] \dot{Z}_{1\partial}}{\dot{U}_{2\partial} \dot{F} - [\dot{U}_{2\partial}(\dot{Z} + j\Delta X) - jkX\dot{U}_{1\partial}] \dot{Z}_{1\partial}}. \quad (20)$$

Представим напряжения генератора в комплексной форме

$$\dot{U}_1 = U_{1m} e^{j\varphi}, \quad \dot{U}_2 = U_{2m} e^{-j\varphi}, \quad (21)$$

$$\dot{U}_{1\partial} = U_{1\partial m} e^{j(\varphi + \varphi_{\partial})}, \quad \dot{U}_{2\partial} = U_{2\partial m} e^{-j(\varphi - \varphi_{\partial})}. \quad (22)$$

При этом отношение амплитуд напряжений на контурах будет несколько отличаться от единицы на величину $2\delta_u$, т. е. $\frac{U_{1m}}{U_{2m}} = 1 + 2\delta_u$,

амплитуды же выходных напряжений генераторов с достаточной степенью точности можно считать равными. Тогда выражение (20) преобразуется к виду

$$1 + 2\delta_u = \frac{e^{j2\varphi} \cdot \dot{F} - [e^{j2\varphi}(\dot{Z} - j\Delta X) - jkX] \dot{Z}_{1\partial}}{\dot{F} - [(\dot{Z} + j\Delta X) - jkX e^{j2\varphi}] \dot{Z}_{1\partial}}, \quad (23)$$

откуда имеем

$$2\rho\delta_u - j2\Delta X Z_{1\partial} + jkX Z_{1\partial} (e^{j2\varphi} - e^{-j2\varphi}) = 0, \quad (24)$$

$$\text{где } \rho = \dot{F} - [(\dot{Z} + j\Delta X) - jkX e^{j2\varphi}] \dot{Z}_{1\partial}.$$

Отбрасывая бесконечно малые высших порядков и вводя коэффициент затухания $d = \frac{r}{X}$, после элементарных преобразований имеем

$$\begin{aligned} & (d^2 + d\eta - \delta_L + k \cos 2\varphi - k\eta \sin 2\varphi) \delta_u + \\ & + j(d + \eta - \eta\delta_L + k\eta \cos 2\varphi + k \sin 2\varphi) \delta_u = \\ & = \delta_L + k\eta \sin 2\varphi + j(\eta\delta_L - k \sin 2\varphi). \end{aligned} \quad (25)$$

Приравняв действительные и мнимые члены в левой и правой ча-

стях выражения (25) и исключив $\delta_{\text{и}}$, запишем окончательное выражение для индуктивной симметричной расстройки контуров

$$\delta_L = -k \sin 2\varphi \frac{(d + \eta)^2 + k \cos 2\varphi}{\eta + d} . \quad (26)$$

Анализ этого выражения показывает, что чувствительность ФГС $S_{\varphi}(L) = \frac{d\varphi}{d\delta_L}$ существенно зависит от коэффициента связи k , затухания контура d , параметра η .

С целью проверки теории ФГС со связью генераторов через взаимную индуктивность датчиков было проведено экспериментальное исследование зависимости чувствительности $S_{\varphi}(L)$ при стабилизации амплитуд выходных напряжений генераторов, $d=0,01275$, $\eta=0,0741$, $k=0,001$ и $k=0,01$. Расхождение теоретических и экспериментальных данных при $k=0,001$ не превышает 20%, при $k=0,01$ — 5%.

Исследования показали высокую чувствительность (1000÷3000 град/%) ФГС со связью через взаимную индуктивность датчиков и возможность ее использования для металлоискателей, обнаружителей металлических предметов и дефектоскопов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. З. М и х л и н. Высокочастотные емкостные и индуктивные датчики. М., Госэнергоиздат, 1960.
 2. F. Klutke. „Archiv für technisches Messen“, Januar, 1961, N 300.
 3. К. С. П о л у л я х. К теории фазогенераторного преобразователя. «Измерительная техника», 1970, № 1, 54.
 4. Неразрушающие испытания. Справочник. Ред. Р. М а к-М а с т е р. Пер. с англ. М.-Л., «Энергия», 1965.
-