

С. К. ТОКАЕВ
(Харьков)

АВТОГЕНЕРАТОРНЫЕ МОСТЫ ДЛЯ НЕКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

Значительное упрощение измерительных схем, повышение точности и стабильности измерения, осуществление взаимозаменяемости датчика в промышленных кондуктометрах можно получить путем применения автогенераторных мостовых измерительных схем [1].

Суть метода в следующем: если между входом и выходом усилителя в цепь обратной связи включить измерительный мост, то при его равновесии связь будет отсутствовать. При разбалансе моста, вследствие изменения фазового сдвига на 180° , осуществляется либо положительная, либо отрицательная обратная связь. Если затухание моста будет меньше коэффициента усиления усилителя, то при этом соответственно произойдет возникновение или срыв генерации.

Генерация обеспечивается амплитудными и фазовыми соотношениями в системе. Амплитудные соотношения выполняются за счет выбора коэффициента усиления усилителя из условия

$$K_y > \frac{U_0}{e}, \quad (1)$$

где K_y — коэффициент усиления усилителя; $\frac{U_0}{e}$ — затухание моста. Фазовые соотношения в системе определяются условием

$$\varphi_y + \varphi_k + \varphi_m = 2\pi n, \quad (2)$$

где $n=0,1, \dots$. Фазовый сдвиг усилителя φ_y автоматическим образом компенсируется при генерации за счет расстройки контура. Величина относительной расстройки может быть определена из выражения [2]

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_y}{2Q}, \quad (3)$$

где φ_y — фазовый сдвиг усилителя; Q — добротность контура.

Для определения затухания моста найдем величину активного сопротивления плеча моста с датчиком типа «жидкостный виток потерь» (рис. 1).

Для измерительного плеча моста и частоты тока порядка десятков килогерц можно записать

$$Z_{ab} = r + j\omega L_1 - j\frac{1}{\omega C} - j\omega L_{\text{вн}} + R_{\text{вн}}, \quad (4)$$

где r — активное сопротивление катушки индуктивности; $L_{\text{вн}}$ — внесенная индуктивность «жидкостного витка»; $R_{\text{вн}}$ — внесенное активное сопротивление «жидкостного витка».

Рассматривая цепь как индуктивно связанную [3], найдем

$$R_{\text{вн}} = \frac{\omega^2 M^2 R_{\text{ж}}}{R_{\text{ж}}^2 + \omega^2 L_2^2}, \quad (5)$$

$$L_{\text{вн}} = \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_{\text{ж}}^2 + \omega^2 L_2^2}, \quad (6)$$

где $R_{\text{ж}}$ — сопротивление «жидкостного витка»; L_2 — индуктивность «жидкостного витка».

Для тороидального трансформатора с ферромагнитным сердечником коэффициент связи близок к единице.

После соответствующих подстановок для резонансной частоты получим

$$\omega_0^2 = \frac{R_{\text{ж}}^2}{L_1 C R_{\text{ж}}^2 - L_2^2}, \quad (7)$$

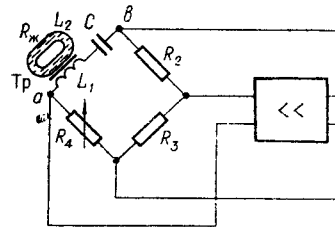


Рис. 1.

а для активной составляющей сопротивления плеча моста:

$$R = r + \frac{L_2}{R_{ж}lC} \quad (8)$$

Затухание определяется по известным соотношениям для четырехплечего моста с учетом изменения активной составляющей.

Таким образом, при частоте генерации, определяемой частотой контура, сопротивление плеча активно, хотя и зависит от величин индуктивности «жидкостного витка»

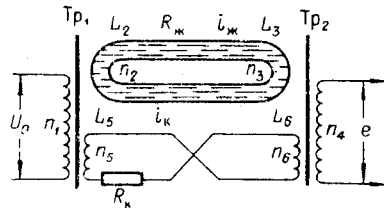


Рис. 2.

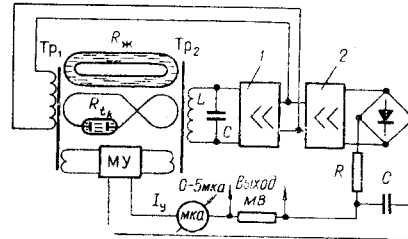


Рис. 3.

ка» L_2 и емкости контура C . Поэтому для уменьшения погрешности, связанной с изменением параметров магнитного сердечника, например от температуры, приходится применять соответствующие меры.

Взаимозаменяемость датчика, вследствие разброса параметров магнитного сердечника, также затруднительна. Свободной от указанных недостатков является схема автогенераторного двухтрансформаторного моста с «жидкостным витком связи» [4] (рис. 2).

Определим затухание двухтрансформаторного моста при изменении электропроводности соответствующей чувствительности моста $\varepsilon = \Delta\kappa/\kappa$. Ток, наводимый в жидкостном витке, составляет

$$i_{ж} = \frac{U_0 n_2}{n_1 (R_{ж} + j\omega L_2 + j\omega L_3)} \quad (9)$$

Магнитный поток, наводимый в трансформаторе Tr_2 током $i_{ж}$, описывается формулой

$$\Phi_{ж} = i_{ж} n_3 = \frac{U_0 n_2 n_3}{n_1 (R_{ж} + j\omega L_2 + j\omega L_3)} \quad (10)$$

Аналогично магнитный поток, наводимый компенсационным током, определяется выражением

$$\Phi_{к} = i_{к} n_6 = \frac{U_0 n_5 n_6}{n_1 (R_{к} + j\omega L_5 + j\omega L_6)} \quad (11)$$

При компенсации $\Phi_{ж} = \Phi_{к}$, встречно направлены и э. д. с. на выходе равна нулю.

Изменение электропроводности «жидкостного витка», соответствующего чувствительности ε , вызовет приращение магнитного потока

$$\Delta \Phi_{ж} = \frac{U_0 n_2 n_3 \varepsilon}{n_1 (R_{ж} + j\omega L_2 + j\omega L_3)} \quad (12)$$

и появление э. д. с. на выходе

$$e = \frac{i_{ж} \omega L_3 n_4 \varepsilon}{n_3} = \frac{U_0 \omega L_3 n_2 n_4 \varepsilon}{n_1 (R_{ж} + j\omega L_2 + j\omega L_3)} \quad (13)$$

Если величину L_3 выразить через параметры тороидального сердечника трансформатора и принять $n_2 = 1$, $n_3 = 1$ и $|R_{ж}| \gg |\omega L_2 + \omega L_3|$, то

$$\frac{U_0}{l} = \frac{1,27 \cdot 10^6 l n_1 R_{ж}}{f S \mu n_4 n_3^2 \varepsilon} \quad (14)$$

где S , l , μ — соответственно сечение, длина магнитной силовой линии, магнитная проницаемость тороидального сердечника трансформатора Tr_2 ; f — частота тока моста.

Как видно, затухание двухтрансформаторного моста зависит от многих факторов и связано с параметрами магнитных цепей. Вследствие большого затухания двухтрансформаторного моста с одним «жидкостным витком связи» чувствительность схемы ограничивается коэффициентом усиления усилителя. Практически достижимо измерение электропроводностей с точностью до 1% в диапазоне $1-10^{-3}$ см/см.

Не менее важное значение для стабильной работы схемы имеет баланс фазовых соотношений.

Двухтрансформаторный мост при $R_{ж} \neq 0$, пропорциональности соотношения реактивных и активных составляющих плеч моста $\frac{x_{ж}}{R_{ж}} = \frac{x_{к}}{R_{к}}$ и разбалансе на ΔR

дает фазовый сдвиг между питающим напряжением и э. д. с. на выходе, соответствующий 90° . Чтобы обеспечить условие баланса фаз (2), целесообразно выходную обмотку моста включить как индуктивность контура, определяющего частоту генерации; при этом фазовый сдвиг моста становится кратным π , а величина выходного сигнала возрастает в Q раз.

Так как изменение параметров сердечника трансформатора вызывает только изменение резонансной частоты контура, которая не входит в величину сопротивления компенсирующего витка, то точность уравнивания и измерения остается неизменной. Этим обуславливается возможность обеспечения взаимозаменяемости датчика.

Автоматическую компенсацию и съем информации можно осуществить через систему отрицательной обратной связи с помощью электрически управляемых элементов (терморезистора, магнитного усилителя, датчика Холла и т. п.).

Лабораторные испытания макета прибора (рис. 3) показали хорошие результаты. При коэффициенте усиления усилителя $K_y = 3000$ и фазовом сдвиге $\varphi_y = 10 \div 15^\circ$ погрешность измерения не хуже 1,0% в диапазоне электропроводности $10^{-2} \div 1$ см/см (см. таблицу). Датчик выполнен на тороидальных сердечниках из феррита марки 2000НН размером $100 \times 60 \times 15$. Частота генерации 10 кГц. Выход токовый 0—5 ма.

Шкала измерения, см/см	Измеряемая электропроводность, см/см	Выходной ток, ма	Показание прибора, ма	Погрешность измерения, отнесенная к максимальному значению электропроводности шкалы, %
0,01 ÷ 0,011	0,0102	1,0	1,15	0,32
	0,0105	2,5	2,5	0
	0,0108	4,0	4,0	0
0,01 ÷ 0,02	0,012	1,0	0,9	1,0
	0,015	2,5	2,5	0
	0,018	4,0	4,0	0
0,5 ÷ 0,55	0,570	1,0	1,25	0,46
	0,525	2,5	2,5	0
	0,540	4,0	4,0	0
0,5 ÷ 1,0	0,6	1,0	0,9	1,0
	0,75	2,5	2,55	0,5
	0,9	4,0	4,0	0
0,9 ÷ 1,0	0,92	1,0	1,15	0,25
	0,95	2,5	2,6	0,15
	0,98	4,0	4,13	0,25

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Двинских. Измерительные схемы с самовозбуждением. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
2. Б. П. Асеев. Фазовые соотношения в радиотехнике. М., Связьиздат, 1959.
3. Б. П. Асеев. Колебательные цепи. М., Связьиздат, 1955.
4. С. К. Токаев. Кондуктометрическое устройство. Авторское свидетельство № 208323.—ИПОТЗ, 1968, № 3.

Поступило в редакцию
18 ноября 1968 г.,
окончательный вариант —
13 августа 1969 г.