

В. В. МИРОШНИКОВ, докт. техн. наук, ВНУ им. В. Даля, Луганск;
С. В. КОСТИН, соискатель, ВНУ им. В. Даля, Луганск;
Н. И. КАРМАНОВ, аспирант, ВНУ им. В. Даля, Луганск;
Н. В. МАРТЫНЕНКО, аспирант, ВНУ им. В. Даля, Луганск

РЕЗОНАНСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ФЕРРОЗОНДА

В статье был проведен анализ особенностей работы феррозонда в параметрическом режиме, включенного по мостовой схеме. Также были получены аналитические зависимости для расчета функций преобразования феррозондов стержневого типа, включенных по мостовой схеме с параллельной емкостью. Установлено, что выходной сигнал мостовой схемы в режиме параметрического усиления в 1,2 — 1,6 раза больше, чем в схеме со вторичной обмоткой.

У статті було проведено аналіз особливостей роботи ферозонду у параметричному режимі, що включений за мостовою схемою. Також було отримано аналітичні залежності для розрахунку функції перетворення ферозондів стрижньового типу, які включені за мостовою схемою з паралельною ємністю. Встановлено, що вихідний сигнал мостової схеми у режимі параметричного підсилення в 1,2 — 1,6 разів більше, ніж у схемі зі вторинною обмоткою.

The characteristics of flux-gate sensors in parametric mode connected to the bridge circuit were analyzed in the paper. Also analytical expressions for calculating transform functions of bar flux-gate sensor connected to the bridge circuit with parallel capacitance were obtained. It is established that the output of the bridge circuit in a parametric amplification mode at 1.2 — 1.6 times more than in the circuit with the secondary winding.

Ферромодуляционный магниточувствительный элемент (феррозонд) является одним из наиболее чувствительных элементов к изменению параметров магнитного поля. Это определило его широкую область применения от магниторазведки до дефектоскопии деталей и изделий. В зависимости от режима работы различается чувствительность и амплитуда выходного сигнала феррозонда. Наиболее широко применяемый режим работы феррозонда на второй гармонике. Несмотря на все свои достоинства, он обладает одним существенным недостатком — амплитуда выходного сигнала составляет единицы милливольт. Это создает определенные сложности при обработке данного сигнала, особенно с высоким уровнем промышленных помех. Менее широко применяемый импульсный режим возбуждения феррозонда имеет более высокий порог чувствительности по сравнению с режимом второй гармоники, однако выходной сигнал составляет единицы вольт. Данный режим работы феррозонда хорошо зарекомендовал себя при измерении магнитных полей свыше 50 — 100 А/м особенно в приборах, работающих в производственных условиях.

Таким образом, имеется необходимость совмещения положительных свойств двух режимов работы для достижения максимальной чувствительности и помехоустойчивости феррозонда. Решение данной задачи осуществляется с помощью изменения нагрузки выходной цепи

феррозонда.

Исследованию работы ферромодуляционных устройств под нагрузкой, в частности, емкостной, приводящей к повышению его чувствительности, посвящен ряд работ [1 – 4].

Режим параметрического резонанса резко повышает коэффициент преобразования феррозондового датчика. Из теории параметрического возбуждения электрических колебаний в LC -контуре известно, что наиболее устойчивый резонанс наблюдается на частоте вдвое большей, чем частота изменения одного из параметров контура в рассматриваемом случае: его индуктивности. Применительно к феррозонду с выходом на второй гармонике это означает, что проницаемость его сердечников, а, следовательно, и индуктивность измерительной обмотки должны изменяться с частотой четвертой гармоники. Зависимость индуктивности обмотки феррозондов от времени можно представить так

$$L(t) = L_0 (1 + \Gamma_2 \cos 2\omega t + \Gamma_4 \cos 4\omega t), \quad (1)$$

где $\Gamma_2 = \frac{L_2}{L_0}$, $\Gamma_4 = \frac{L_4}{L_0}$ — коэффициенты ряда; L_0 , L_2 и L_4 — постоянная составляющая амплитуды второй и четвертой гармоник индуктивности соответственно.

Ток в контуре выходной цепи, настроенный на частоту $2\omega = \frac{1}{\sqrt{2L_0C}}$ будет

$$i_2(t) = I_{m2} \sin(2\omega t + \varphi). \quad (2)$$

Выходное напряжение феррозонда будет равным

$$U_{2n} = \frac{d}{dt} [L(t)i_2(t)]. \quad (3)$$

При этом окажется, что член, пропорциональный коэффициенту Γ_2 , будет содержать только постоянную составляющую и четвертую гармонику, а член, пропорциональный коэффициенту Γ_4 — вторую и шестую гармоники [5].

Для второй гармоники выходного сигнала напряжения при $\varphi = \frac{\pi}{4}$ имеем:

$$U_2(\Gamma_4) = \mp \omega L_0 \Gamma_4 I_2 \cos\left(2\omega t \mp \frac{\pi}{4}\right) = -X_L I_2 \sin\left(2\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right). \quad (4)$$

Из этого выражения видно, что величина $X_L = \omega L_0 \Gamma_4$ ведет себя как отрицательное сопротивление по отношению к току i_2 .

При кусочно-линейной аппроксимации кривой перемагничивания сердечников и синусоидальной волне поля возбуждения коэффициенты ряда Фурье, которым представляется зависимость дифференциальной электромагнитной проницаемости, будут равны [1 – 3].

Постоянная составляющая

$$\mu_{g0} = \mu_{g\max} \frac{\theta}{\pi},$$

гармоники

$$\mu_{g2n} = \mu_{g\max} \frac{1}{\pi} n \sin 2n\theta.$$

Здесь $\theta = \arcsin \frac{H_S}{H_m}$, H_S — напряженность насыщения; H_m — амплитуда тока возбуждения.

При $\theta = \frac{\pi}{4}$ ($H_m = \sqrt{2}H_S$) имеются оптимальные условия для возникновения тока второй гармоники, однако параметрического усиления сигнала в этом случае нет [86]. Это происходит потому, что коэффициент μ_{g4} при $\theta = \frac{\pi}{4}$ равен нулю. При $\theta = \frac{\pi}{8}$ или $\theta = \frac{3\pi}{8}$ коэффициент μ_{g2} несколько уменьшается, но зато достигает максимального значения коэффициент μ_{g4} .

При резонансе коэффициент передачи феррозондового датчика увеличивается на 2 – 3 порядка, что позволяет обойтись без фильтров второй гармоники и без резонансных усилителей. При этом возрастает устойчивость всей измерительной схемы, которая охватывается очень глубокой отрицательной обратной связью улучшающей метрологические характеристики измерительного тракта.

Для увеличения коэффициента преобразования (чувствительности) феррозондового датчика, как было сказано выше, можно использовать режим резонанса, который возникает при включении емкости в выходную цепь модулятора. Использованию резонансного режима ферромодуляционных устройств посвящено несколько теоретических исследований [3, 4, 6], результаты которых позволяют определить границу неустойчивого режима работы феррозондового датчика. Однако важным является не только определение границы устойчивости феррозонда, но и

определение его коэффициента преобразования в резонансном режиме работы, что и является предметом теоретических исследований.

Возможными являются два способа построения принципиальной электрической схемы модулятора: трансформаторная (рис. 1) и мостовая (рис. 2).

При допущении, что генератором синусоидального возбуждения является источник тока n и сопротивление R_2 велико, электрическую схему выходной цепи модулятора, показанную на рис. 1 можно привести к виду, показанному на рис. 2.

Если зависимость $B(H)$ для материала электромагнитного модулятора разложить в ряд Тейлора в окрестности точки $H = H_1$, то в результате получится

$$B(H) = B(H_1) + \left. \frac{\partial B}{\partial H} \right|_{H=H_1} \cdot \Delta H + \frac{1}{2} \cdot \left. \frac{\partial^2 B}{\partial H^2} \right|_{H=H_1} \cdot \Delta H^2 + \dots \quad (5)$$

Для двух сердечников феррозонда можно записать

$$B_I = B(H_1 + H_2 + H_0); \quad B_{II} = B(H_1 - H_2 - H_0);$$

где H_1 – напряженность, созданная током возбуждения; H_2 – напряженность, созданная током i_2 , для схемы, показанной на рис. 1, для схемы, приведенной на рис. 2, током i ; H_0 – напряженность измеряемого поля.

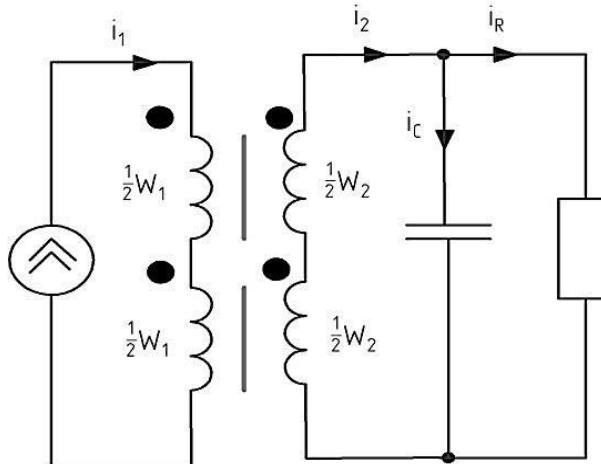


Рис. 1. Трансформаторная схема феррозондового датчика

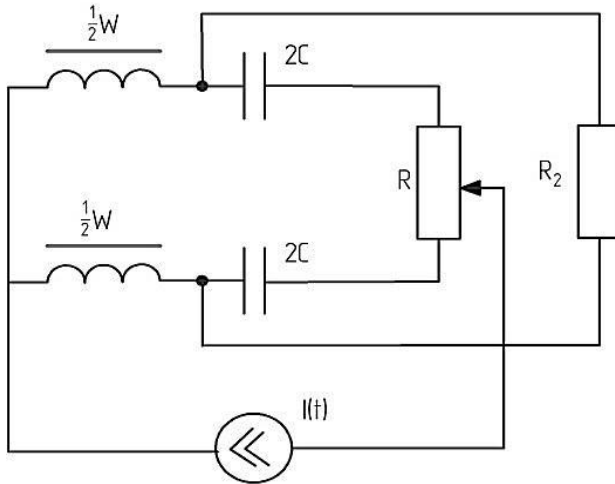


Рис. 2. Мостовая схема феррозондового датчика

Потокосцепления катушек феррозондов описываются следующими соотношениями:

$$\psi_I = \frac{W^2 \cdot S}{l} \cdot B(i_1 + i_2 + i_0); \quad \psi_{II} = \frac{W^2 \cdot S}{l} \cdot B(i_1 - i_2 - i_0),$$

или

$$\psi_I - \psi_{II} = \mu_0 \frac{2W^2 \cdot S}{l} \cdot \mu_s(H) \cdot (i_2 + i_0) = L(H) \cdot (i_2 + i_0);$$

$$\mu(H) = \frac{dB}{dH}. \quad (6)$$

Э.Д.С. индукции в выходной обмотке феррозонда равна

$$\frac{d}{dt}(\psi_I - \psi_{II}) = L_0 \left(\frac{di_2}{dt} \mu + i_2 \frac{\partial \mu}{\partial t} + i_0 \frac{\partial \mu}{\partial t} \right), \quad (7)$$

В дальнейшем обозначается $\dot{\mu} = \frac{d\mu}{dt}$, $L_0 = \frac{2\mu_0 W^2 S}{l}$.

Для схемы, приведенной на рис. 1 можно записать следующие очевидные соотношения

$$(L_0 \mu i_2 + L_0 i_0)' - u_c = v, \quad (8)$$

$$i_2 = i_R + i_C = \frac{u_c}{R} + c \frac{du_c}{dt}. \quad (9)$$

При подстановке (9) в (8) получается

$$CL_0\mu \frac{d^2 u_c}{dt} + \left[L_0\mu' c + \frac{L_0\mu}{R} \right] \frac{du_c}{dt} + \left[L_0\mu' \frac{1}{R} + 1 \right] u_c = -L_0\mu' i_0. \quad (10)$$

Для электрической схемы феррозонда показанной на рис. 2 уравнения имеют вид

$$CL_0\mu \frac{d^2 u_c}{dt} + \left[L_0\mu' c + RC \right] \frac{du_c}{dt} + u_c = -L_0\mu' i_0. \quad (11)$$

Решения (10) и (11) находят в виде

$$u_c = M \cos 2\omega t + N \sin 2\omega t, \quad (12)$$

тогда

$$u_c' = -2\omega M \sin 2\omega t + 2\omega N \cos 2\omega t, \quad (13)$$

и

$$u_c'' = -4\omega^2 M \cos 2\omega t - 4\omega^2 N \sin 2\omega t, \quad (14)$$

Зависимость $B(H)$ аппроксимируется кусочно-ломаной линией

$$B = \mu_0\mu_c H \quad \text{при} \quad |H| < H_s$$

$$B = \mu_0\mu_c H \quad \text{при} \quad |H| > H_s$$

где μ_c – максимальная относительная электромагнитная проницаемость сердечников феррозонда.

Величину μ_c можно считать равной относительной электромагнитной проницаемости при насыщении материала сердечника.

Как уже было сказано, ток в цепи возбуждения изменяется синусоидально и, следовательно, так же изменяется направленность электромагнитного поля в сердечнике феррозонда.

$$H(t) = H_m \sin \omega t$$

Обычно выбирается $H_m = \sqrt{2}H_s$, так как это обеспечивает режим феррозонда оптимальный по критерию формирования второй гармоники.

Зависимость электромагнитной проницаемости от времени представляется следующей функцией

$$k\pi - \theta < \omega t < k\pi + \theta; \quad \mu(t) = \mu_s,$$

при $k = 0, 1, 2, 3 \dots$; $\mu(H) = m$ для всех остальных моментов времени;

$$\theta = \arcsin \frac{H_s}{H_m}$$

Функция $\mu(t)$ периодическая и четная, её можно разложить в ряд Фурье

$$\mu(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t, \quad n = 2, 4, 6, \dots \quad (15)$$

где $a_0 = -\frac{4}{\pi}(\mu_c - \mu_s)\theta + 2\mu_s$; $a_n = -\frac{4}{\pi n}(\mu_c - \mu_s)\sin n\theta$.

Ограничивая тремя первыми членами ряда, то есть считается, что

$$\mu(t) = \frac{a_0}{2} + a_2 \cos 2\omega t + a_4 \cos 4\omega t, \quad (16)$$

$$\mu'(t) = -2a_2\omega \sin 2\omega t - 4a_4\omega \sin 4\omega t. \quad (17)$$

Обозначим

$$L_0 = \frac{2}{a_0\omega^2 C_0}; \quad C_0 = \frac{2}{L_0\omega^2 a_0}$$

тогда при подстановке (12), (13), (14), (15), (16) в (10) получается

$$\begin{aligned} & \frac{C}{C_0} \frac{2}{a_2\omega^2} \left(\frac{a_0}{2} + a_2 \cos 2\omega t + a_n \cos 4\omega t \right) \frac{d^2 u_c}{dt^2} + \\ & + \left[\frac{C}{C_0} \frac{2}{a_2\omega^2} (-a_2\omega \sin 2\omega t + 4a_4\omega \sin 4\omega t) + \frac{1}{R} \frac{2}{a_2\omega^2 C_0} \left(\frac{a_0}{2} + a_2 \cos 2\omega t + a_4 \cos 4\omega t \right) \right] \frac{du_c}{dt} + \\ & + \left[\frac{2}{a_2\omega^2 C_0} (-2a_2\omega \sin 2\omega t + 4a_4\omega \sin 4\omega t) \frac{1}{R} + 1 \right] n_c = \\ & = -\frac{2}{a_2\omega^2 C_0} (-2a_2\omega \sin 2\omega t - 4a_4\omega \sin 4\omega t) i_0. \end{aligned}$$

В результате преобразований получается

$$\begin{aligned} & \left(\frac{C}{C_0\omega^2} + \frac{C}{C_0} \frac{2a_2}{a_0\omega^2} \cos 2\omega t + \frac{C}{C_0} \frac{2a_n}{a_0\omega^2} \cos 4\omega t \right) (-4\omega^2 M \cos 2\omega t - 4\omega^2 N \sin 2\omega t) + \\ & + \left[-\frac{C}{C_0} \frac{4a_2}{a_0\omega^2} \sin 2\omega t - \frac{C}{C_0} \frac{8a_4}{a_0\omega^2} \sin 4\omega t \frac{1}{k\omega^2 C_0} + \frac{1}{k} \frac{2a_2}{a_0\omega^2 C_0} \cos 2\omega t + \frac{1}{k} \frac{2a_4}{a_0\omega^2 C_0} \cos 4\omega t \right] \times \\ & \times (-2\omega M \sin 2\omega t + 2\omega N \cos 2\omega t) + \left[\frac{4a_2}{ka_0\omega C_0} \sin 2\omega t - \frac{8a_2}{ka_0\omega C_0} \sin 4\omega t + \frac{2a_2}{a_0\omega^2 C_0} \cos 2\omega t \right] \times \\ & \times (M \sin 2\omega t + N \cos 2\omega t) = \frac{4a_2 i_0}{a_0\omega C_0} \sin 2\omega t + \frac{8a_4 i_0}{a_0\omega C_0} \sin 4\omega t. \quad (18) \end{aligned}$$

Оставляя в (18) слагаемые, содержащие тригонометрические функции с аргументом $2\omega t$ по

$$-\frac{4CM}{C_0} \cos 2\omega t - \frac{4Ca_2M}{C_0 a_0} \cos^2 2\omega t - \frac{4CN}{C_0} \sin \omega t + \frac{4Ca_2N}{C_0 a_0} \sin 2\omega t +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{8Ca_4N}{C_0a_0} \cos 2\omega t - \frac{4CM}{C_0a_0k\omega} \sin 2\omega t - \frac{8Ca_4}{C_0a_0} \sin 2\omega t + \frac{4CM}{C_0a_0k\omega} \cos 2\omega t + \\
& + M \cos 2\omega t + N \sin 2\omega t = \frac{4a_2i_0}{a_0\omega C_0} \sin 2\omega t. \quad (19)
\end{aligned}$$

Приравнявая, справа и слева в равенстве (18) члены, содержащие тригонометрические функции можно получить следующую систему уравнений относительно неизвестных M и N .

$$\begin{cases} \frac{4C}{C_0a_0k\omega} M + \left(1 - \frac{8Ca_4}{C_0a_0}\right) N = \frac{4a_2i_0}{a_0\omega C_0}; \\ \left(1 - \frac{8Ca_4}{C_0a_0}\right) M + \frac{4C}{C_0a_0k\omega} N = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Условием решения системы уравнения (20) является на равенство нулю её главного определения

$$\Delta = \frac{C^2}{C_0^2} \left(\frac{64a_4^2}{a_0^2} - \frac{16}{a_0^2 R^2 \omega^2} \right) - 1. \quad (21)$$

Приравнявая (21) нулю, получим

$$\frac{C^2}{C_0^2} = \frac{a_0k\omega}{\sqrt[4]{a_4R^2\omega^2 - 1}}. \quad (22)$$

Условия выполнения неизвестные M и N

$$M = -\frac{16a_2i_0c}{C_0^2a_0^2R\omega^2} \frac{1}{\Delta};$$

$$N = -\frac{4a_2i_0}{C_0a_0\omega} \left(1 + \frac{8Ca_4}{C_0a_0}\right) \frac{1}{\Delta}$$

или, учитывая что $i_0 = \frac{H_0l}{W_2}$

$$M = -\frac{16a_2lc}{C_0^2a_0^2R\omega^2W_2} \frac{H_0}{\Delta}; \quad (23)$$

$$N = -\frac{4a_2l}{C_0a_0\omega W_2} \left(1 + \frac{8Ca_4}{C_0a_0}\right) \frac{H_0}{\Delta}. \quad (24)$$

Для схемы модулятора, согласно уравнению (10) и принятому допущению (11), можно записать

$$\begin{aligned}
& \frac{2l}{a_2\omega^2C_0} \left(\frac{a_0}{2} + a_2 \cos 2\omega t + a_4 \cos 2\omega t \right) \times \left(-4\omega M \cos 2\omega t - 4\omega^2 N \sin 2\omega t \right) + \\
& + \frac{2l}{a_2\omega^2C_0} \left(-2a_2 \sin 2\omega t - 4a_4\omega \sin 4\omega t \right) \times \left(-2\omega M \sin 2\omega t - 2\omega^2 N \cos 2\omega t \right) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +CR\left(-2\omega M \sin 2\omega t - 2\omega^2 N \cos 2\omega t\right) + M \cos 2\omega t + N \sin 2\omega t = \\
& = \frac{2i_0}{a_0\omega^2 C_0} \left(-2a_2\omega \sin 2\omega t - 4a_4\omega \sin 4\omega t\right)
\end{aligned}$$

Откуда следует

$$\begin{aligned}
& \frac{2C}{a_0\omega^2 C_0} \left(-2\omega^2 a_0 M \cos 2\omega t - 2a_0\omega^2 N \sin 2\omega t - 4a_2\omega^2 M \cos^2 2\omega t - 4a_2\omega^2 N \sin 2\omega t \cos \omega t - \right. \\
& -4a_4\omega^2 M \cos 2\omega t \cos 4\omega t - 4a_4\omega^2 N \sin 2\omega t \cos 4\omega t) + \frac{2C}{a_0\omega^2 C_0} (4\omega^2 a_0 M \sin^2 2\omega t - \\
& -4a_0\omega^2 N \sin 2\omega t \cos 4\omega t + 8a_4\omega^2 M \sin^2 2\omega t \sin 4\omega t - 8a_4\omega^2 N \sin 4\omega t \cos 2\omega t) - \\
& -2\omega CRM \sin 2\omega t - 2\omega CRN \cos 2\omega t + N \sin 2\omega t + M \cos 2\omega t = \\
& = \frac{2i_0}{a_0\omega^2 C_0} \left(-2a_2\omega \sin 2\omega t - 4a_4\omega \sin 4\omega t\right) \quad (25)
\end{aligned}$$

Если оставить в (25) слагаемые, содержащие частоту 2ω , то получается

$$\begin{aligned}
& -\frac{4C}{C_0} M \cos 2\omega t - \frac{4C}{C_0} N \sin 2\omega t - \frac{8a_4 C}{a_0 C_0} M \cos 2\omega t + \frac{8a_4 C}{a_0 C_0} N \sin 2\omega t + \frac{16a_4 C}{a_0 C_0} M \cos 2\omega t - \\
& -\frac{16a_4 C}{a_0 C_0} N \sin 2\omega t - 2\omega CRM \sin 2\omega t - 2\omega CRN \cos 2\omega t + N \sin 2\omega t + M \cos 2\omega t = \\
& = \frac{4a_2 i_0}{a_0 \omega C_0} \sin 2\omega t . \quad (26)
\end{aligned}$$

Приравнивая в равнение (26) справа и слева члены с одинаковыми функциями, можно получить систему уравнений для определения M и N

$$\begin{cases}
-\left(\frac{16a_4 C}{a_0 C_0} + 2\omega CR\right)M + \left(1 - \frac{4C}{C_0}\right)M + \left(1 - \frac{8a_4 C}{C_0}\right)N = \frac{4a_0 i_0}{a_0 \omega C_0}; \\
\left(1 - \frac{4C}{C_0} + \frac{8Ca_4}{C_0 a_0}\right)M + 2\omega CRN = 0.
\end{cases} \quad (26)$$

Решением системы уравнений (26) будет

$$M = -\frac{8a_2 CR i_0}{C_0 a_0} \cdot \frac{1}{\Delta}. \quad (27)$$

Приравнивая (8) нулю, получим

$$N = -\frac{4a_2 i_0}{C_0 a_0 \omega} \left(1 - \frac{4C}{C_0} - \frac{8Ca_4}{C_0 a_0}\right) \cdot \frac{1}{\Delta}, \quad (28)$$

где

$$\Delta = -4\omega CR \left(\frac{8a_4C}{a_0C_0} + \omega CR \right) - \left[\left(1 - \frac{4C^2}{C_0} \right) - \left(\frac{8a_4C}{a_0C_0} \right)^2 \right] \quad (29)$$

Используя вышеприведенный метод можно получить значения M и N для более обобщенной схемы выходной цепи феррозонда, которая показана на рис. 3.

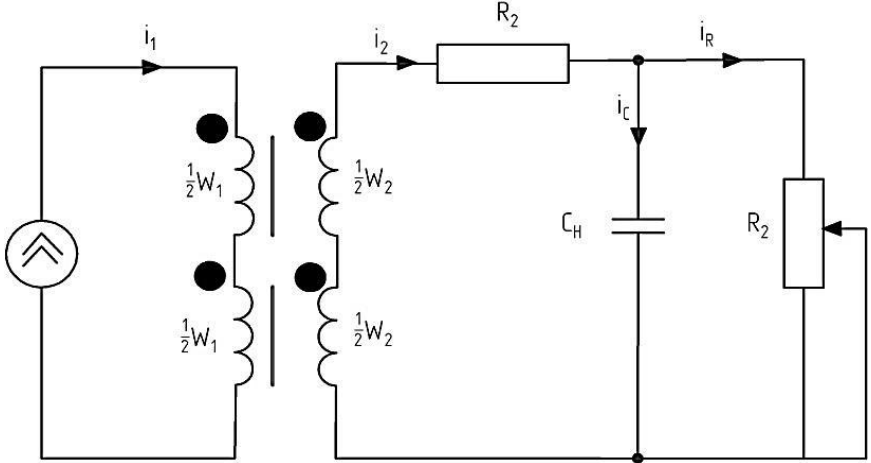


Рис. 3. Обобщенная электрическая схема электромагнитного модулятора

Для этой выходной цепи модулятора получены выражения [7]

$$M = -\frac{1}{\Delta} \left[\frac{1 - a_4}{2\omega z_n C_0} + 2\omega R_2 C_H \right] \frac{1}{\omega a_2 C_0 a_0} \frac{a_2}{a_0} H_0; \quad (30)$$

$$N = -\frac{1}{\Delta} \left[1 - \frac{C_H}{C_0} \left(1 - \frac{a_4}{a_0} \right) + \frac{R_2}{R_H} \right] \frac{1}{\omega a_2 C_H a_0} \frac{a_2}{a_0} H_0; \quad (31)$$

где $Z_H = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_H} \right)^2 + (\omega \cdot C_H)^2}}$

$$\Delta = \left[\left(1 - \frac{a_4}{a_0} \right)^2 - 4\omega^2 R_2^2 C_0^2 \right] \left(\frac{C_H}{C_0} \right)^2 - 2 - \frac{C_H}{C_0} + \frac{1 - \left(\frac{a_4}{a_0} \right)^2}{4\omega C_0} \left(\frac{1}{Z_H} \right)^2 + \left(1 - \frac{R_2}{Z_H} \right). \quad (32)$$

Амплитуда выходного сигнала модулятора тем больше, чем меньше главный определитель (30). Однако, в (31) присутствует слагаемое $\frac{a_2}{a_0}$, которое может обратить Δ в ноль, или сделать его отрицательным. Условием неопределенного значения чувствительности модулятора будет условие $\Delta=0$, которое имеет ноль при некотором значении ёмкости $C_H = C_\infty$, при этом C_∞ / C_0 равно

$$\frac{C_\infty}{C_0} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{a_4}{a_0} \right)^2 + 4\omega^2 C_0^2 R_2^2 \right] \left[\frac{1}{4\omega^2 C_0^2} \left[1 - \left(\frac{a_4}{a_0} \right)^2 \right] \frac{1}{R_n^2} + 1 - \left(\frac{R_2}{a_0} \right)^2 \right]}}{1 - \left(\frac{a_4}{a_0} \right)^2 + 4\omega^2 C_0^2 R_2^2}, \quad (33)$$

поскольку C_∞ / C_0 должно быть действительным, необходимо, чтобы

$$\left\{ \frac{1}{4\omega^2 C_0^2} \left(1 - \left(\frac{a_4}{a_0} \right)^2 + R_2^2 \right) \left(\frac{1}{R_H} \right)^2 + \left(\frac{R_2}{R_H} \right)^2 + 1 \right\} - \frac{1}{1 - \left(\frac{a_4}{a_0} \right)^2 + 4\omega^2 C_0^2 R_2^2} \leq 0,$$

или должно выполняться условие $R_H \geq R_{H.КРИТ}$, где

$$\frac{1}{R_{H.КРИТ}} = \frac{-R_2 \pm \sqrt{R_2^2 - \left[\frac{1}{4\omega^2 C_0^2} \left(1 - \left(\frac{a_4}{a_0} \right)^2 + R_2^2 \right) \right] \frac{4\omega^2 C_0^2 R_2^2 \left(\frac{a_4}{a_0} \right)^2}{1 - \left(\frac{a_4}{a_0} \right)^2 + 4\omega^2 C_0^2 R_2^2}}}{\frac{1}{4\omega^2 C_0^2} \left(1 - \left(\frac{a_4}{a_0} \right)^2 + R_2^2 \right)} \quad (34)$$

Для $R_{H.КРИТ}$ — действительного и положительного

$$R_2 < \frac{1}{2\omega C_0} \frac{a_4}{a_0}. \quad (35)$$

Полученные аналитические зависимости использовались для расчета функций преобразования феррозондов стержневого типа, включенных по

мостовой схеме с параллельной емкостью.

В таблице приведены результаты расчета феррозондов со следующими параметрами мостовой схемы: $a_0 = 120$; $a_2 = 40$; $a_4 = 15$; $C_0 = 2,6 \cdot 10^{-8}$ Ф; $W_2 = 80$; $l = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $R = 300$ Ом; $R_M = 610$ Ом; $C = 0,005$ мкФ; $C_H = 370$ пФ; $G = 8 \cdot 10^{-4} \frac{B}{A/m}$.

Таблица

Зависимость амплитуды второй гармоники феррозондов от величины напряженности измеряемого поля

H_0 , А/м	Мостовая схема U_{2m} , В	Трансформаторная схема U_{2m} , В
0,5	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$
2,0	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$
4,0	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$2,43 \cdot 10^{-2}$
10,0	$8,7 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$
15,0	$12,6 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$
20,0	$15,4 \cdot 10^{-2}$	$9,86 \cdot 10^{-2}$
40,0	$22,3 \cdot 10^{-2}$	$14,3 \cdot 10^{-2}$
50,0	0,29	0,186
100,0	0,42	0,27

В результате параметрического усиления функция преобразования МФД увеличивается в 8 — 10 раз.

Выводы. Для увеличения чувствительности МФД предложено использовать режим параметрического усиления, при котором сигнал феррозонда усиливается на два порядка. Предложена методика расчета резонансного режима в мостовой схеме и в выходной обмотке. Установлено, что выходной сигнал мостовой схемы в режиме параметрического усиления в 1,2 — 1,6 раза больше, чем в схеме со вторичной обмоткой. В режиме параметрического усиления функция преобразования увеличивается в 8 — 10 раз.

Список литературы: 1. *Serson P.N., Hannaford L.W.* A Portable electrical magnetometer // Canadian Journal of Tehnology, 1976. — №34. — PP.232 — 243. 2. Средства измерения параметров магнитного поля / [Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов и др.]. — Л.: Энергия. Ленингр. отдел., 1979. — 320 с. 3. *Яковлев Н.Н.* Особенности работы феррозондового датчика в резонансном режиме / Н.Н. Яковлев // Геофизическая аппаратура. — Л., Недра, 1968. — вып.35. 4. *Рогачевский Б.М.* Параметрический режим магнитомодуляционного датчика (ММД) при ступенчато-прямоугольном поле возбуждения / Б.М. Рогачевский. — Новосибирск: Наука, 1969. — вып.1. — 158 с. 5. *Афанасьев Ю.В.* Состояние и перспективы развития феррозондовой магнитометрии / Ю.В. Афанасьев // Геофизическая аппаратура. — Л.: Недра, 1977. — вып.60. 6. *Вагнер И.В.* Параметрическая потокочувствительная магнитная головка / И.В. Вагнер // Радиотехника. — 1968. — Т.23. — №8. — С. 58 — 65. 7. *Acuna M.N., Searse C.S., Seek J.B., and Scheifele J.* The MAGSAT vector magnetometer for the measurement of geomagnetic field // NASA Tesh. Memorandum 79656, Oct. 1978.

Надійшла до редакції 15.04.12