

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФЕРРОЗОНДОВ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ

Яковенко В. В., Полтавцев А. Ю., Калмыков М. А.
Восточноукраинский национальный университет
eltech@snu.edu.ua

The estimation of influence of parameters of the real generator of excitation on function of transformation two-element ferrozond on the second and fourth harmonics is given. The result is received by a numerical method. Fig. 4, Sour. 3.

Несмотря на заметные успехи в совершенствовании гальваномагнитных датчиков, феррозонды остаются основными магниточувствительными элементами приборов магнитного неразрушающего контроля, так как имеют более низкий порог чувствительности и более высокую временную и температурную стабильность параметров. Теория феррозондов сложилась еще в 60-е годы прошлого столетия благодаря работам Розенблата М. А., Фридмана Л. Х., Дрожжиной В. И., Агеева М. Д., Пономарева Ю. Ф., Афанасьева Ю. В., Спектора Ю. И., Михайловского В. Н., Беркмана Р. Я., Синицкого Л. А. и др. Однако при разработке теории феррозондов авторы стремились получить аналитические зависимости для их функций преобразования при некоторой идеализации режимов работы.

Так, при определении функции преобразования феррозонда обычно [1, 2, 3] полагается, что генератор возбуждения является генератором тока и ток является одним из определяющих факторов при ее расчете. В действительности генератор возбуждения не является ни генератором тока, ни генератором напряжения, а есть источник электрической энергии с конечным выходным сопротивлением. Поэтому величина тока возбуждения зависит от напряжения источника возбуждения, его выходного сопротивления и индуктивного сопротивления обмотки возбуждения, которое, в свою очередь зависит от величины тока возбуждения.

В статье приводится метод расчета коэффициента преобразования феррозонда с учетом всех параметров электрической цепи возбуждения и пределы изменения этих параметров, для которых возможно применение известных формул для расчета коэффициента преобразования феррозондов.

Рассматривается широко распространенная схема двухэлементного феррозонда второй гармоники (рис. 1а). Поскольку обычно выходная обмотка феррозонда подсоединяется к входу усилителя второй гармоники с большим выходным сопротивлением, считается что выходная обмотка феррозонда находится в режиме холостого хода.

При расчете функции преобразования феррозонда принимаются следующие допущения:

- Электромагнитные процессы в сердечниках феррозонда протекают без гистерезиса.
- Влияние вихревых токов и рассеяния магнитного потока сердечников пренебрегается.
- Э. д. с. возбуждения меняется по синусоидальному закону и не содержит высших гармоник.
- Петля гистерезиса аппроксимируется функцией арктангенса [1].

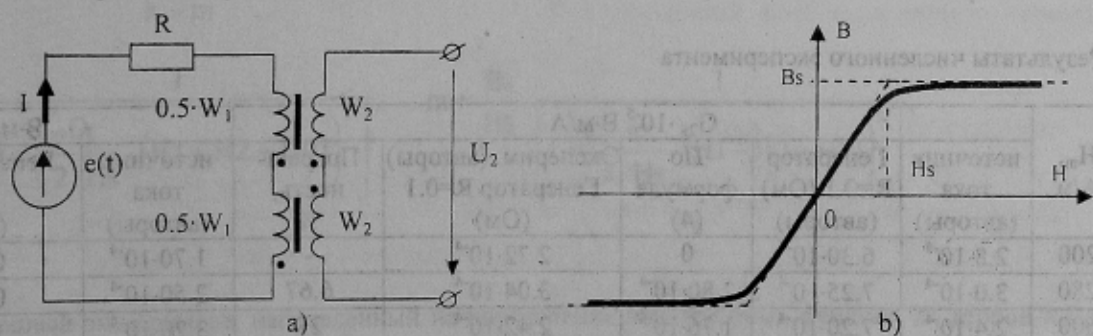


Рис. 1. – Электрическая принципиальная схема феррозонда (а) и аппроксимация петли гистерезиса сердечников (б)

Индукция в сердечниках феррозондов равна

$$B_{\text{a}} = \frac{2 \cdot B_s}{\pi} \arctg\left(\frac{\pi}{2 \cdot H_s} \cdot (H + H_0)\right); \quad B_{\text{b}} = \frac{2 \cdot B_s}{\pi} \arctg\left(\frac{\pi}{2 \cdot H_s} \cdot (H - H_0)\right); \quad (1)$$

где H_0 – напряженность измеряемого поля;

Выходное напряжение феррозонда будет равно:

$$U_2(t) = W_2 \cdot S \cdot \frac{B_s}{H_s} \cdot \left[\frac{1}{1 + \left[\frac{\pi \cdot (H + H_0)}{2 \cdot H_s} \right]^2} + \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi \cdot (H - H_0)}{2 \cdot H_s} \right]^2} \right] \cdot \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

где W_2 – число витков выходной обмотки феррозонда;

H – напряженность в сердечнике, создаваемая генератором возбуждения.

Нахождение выходного напряжения производится численным методом. Численным методом определялись амплитуда второй и четвертой гармоник выходного напряжения феррозонда. Численный эксперимент выполнялся для следующих значений величин: $H_s=200, 1000$ А/м; $B_s=0,7$ (Тл); $S = 5 \cdot 10^{-8}$ (м²); $b=5 \cdot 10^{-3}$ (м), $W_2=200$; $W_1=200$; $R=0.01, 1, 10, 100$ (Ом).

Величина амплитуды э. д. с. цепи возбуждения E_m выбиралась так, чтобы амплитуда напряженности магнитного поля возбуждения принимала значения, равные тем, которые имеют место тогда, когда возбуждение производится источником тока. При возбуждении источником тока выходное напряжение феррозонда считалось равным:

$$U_2(t) = \frac{W_2 \cdot S \cdot B_s}{H_s} \cdot \omega \cdot \left[\frac{1}{1 + \left[\frac{\pi}{2 \cdot H_s} \right]^2 \cdot (H_m \cdot \sin(\omega \cdot t) + H_0)^2} + \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi}{2 \cdot H_s} \right]^2 \cdot (H_m \cdot \sin(\omega \cdot t) - H_0)^2} \right] \cdot H_m \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (3)$$

После расчета выходного напряжения по формуле (3) численным методом находится амплитуда его второй и четвертой гармоник.

Таким образом, осуществлялось сравнение коэффициентов преобразования феррозонда при возбуждении источником тока и током, создаваемым источником электрической энергии с конечным выходным сопротивлением.

Для сравнения результатов численного эксперимента с данными других источников, коэффициент преобразования для второй гармоники определялся по известным формулам [1].

$$G_2 = \frac{16}{\pi} \cdot \omega \cdot S \cdot W_2 \cdot \mu_0 \cdot m \cdot \frac{H_s}{H_m} \cdot \sqrt{1 - \frac{H_s^2}{H_m^2}} \quad (4)$$

Результаты численного эксперимента

Таблица 1

H_s , А/м	H_m , А/м	$G_2 \cdot 10^{-5}$ В·м/А					G_4 , В·м/А	
		источник тока (авторы)	Генератор $R=0.1$ (Ом) (авторы)	По формуле (4)	Эксперим. (авторы) Генератор $R=0.1$ (Ом)	Погреш- ность, %	источник тока (авторы)	Генератор $R=0.1$ (Ом) (авторы)
200	200	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$6.30 \cdot 10^{-4}$	0	$2.72 \cdot 10^{-4}$	-	$1.70 \cdot 10^{-4}$	$0.60 \cdot 10^{-4}$
200	280	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$7.25 \cdot 10^{-4}$	$2.80 \cdot 10^{-4}$	$3.04 \cdot 10^{-4}$	6.67	$2.50 \cdot 10^{-4}$	$0.95 \cdot 10^{-4}$
200	600	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$7.20 \cdot 10^{-4}$	$1.76 \cdot 10^{-4}$	$2.42 \cdot 10^{-4}$	27	$3.20 \cdot 10^{-4}$	$1.70 \cdot 10^{-4}$
1000	1000	$5.7 \cdot 10^{-5}$	$6.30 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$5.65 \cdot 10^{-5}$	-	$3.45 \cdot 10^{-5}$	$1.25 \cdot 10^{-5}$
1000	1410	$6.0 \cdot 10^{-5}$	$7.25 \cdot 10^{-5}$	$5.6 \cdot 10^{-5}$	$5.83 \cdot 10^{-5}$	6,67	$5.05 \cdot 10^{-5}$	$1.95 \cdot 10^{-5}$
1000	3000	$4.8 \cdot 10^{-5}$	$7.20 \cdot 10^{-5}$	$3.52 \cdot 10^{-5}$	$4.65 \cdot 10^{-5}$	27	$6.05 \cdot 10^{-5}$	$3.70 \cdot 10^{-5}$

Из таблицы видно, что результаты теоретических расчетов по предложенной методике хорошо совпадают с экспериментальными данными, расхождение не превышает 5% при погрешности эксперимента 2,8%.

График приведенный на рис.2 иллюстрирует зависимость коэффициента передачи четвертой гармоники от активного сопротивления в цепи возбуждения и от амплитуды напряженности поля возбуждения.

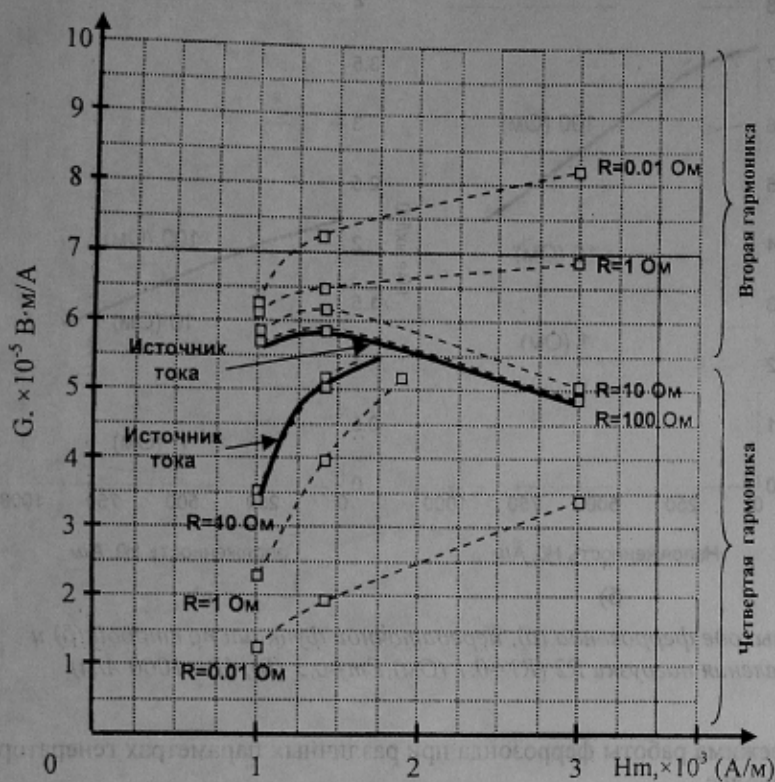


Рис. 2. Зависимость коэффициента преобразования феррозонда от амплитуды напряженности магнитного поля возбуждения, $H_s = 10^3$ (А/м).

Можно также отметить, что при использовании источника напряжения в качестве генератора возбуждения выходной сигнал феррозонда близок к синусоидальному, в то же время как при возбуждении феррозонда источником тока, выходной сигнал феррозонда существенно несинусоидален, поэтому коэффициент передачи феррозонда по четвертой гармонике с уменьшением сопротивления в цепи возбуждения уменьшается.

При работе феррозонда на активную нагрузку, выходное напряжение феррозонда оказывается равным

$$U_2(t) = \frac{H_2 \cdot I \cdot R_2}{W_2}, \quad (5)$$

где H_2 – напряженность в сердечнике, создаваемая током вторичной обмотки;

R_2 – сопротивление во вторичной обмотке феррозонда

При этом H_2 является решением дифференциального уравнения

$$\frac{d}{dt} H_2 \cdot \frac{H_2 \cdot \frac{1}{W_2^2} \cdot R_2 + (k - m) \cdot \frac{d}{dt} H_1}{k + m}, \quad (6)$$

$$k = \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{2 \cdot H_s} \cdot (H_1 + H_2 + H_0) \right)^2}, \quad m = \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{2 \cdot H_s} \cdot (H_1 - H_2 - H_0) \right)^2},$$

Численный эксперимент, направленный на определение передаточных функций по второй и четвертой гармоникам (рис.3.) показал, что изменение сопротивления R_2 во вторичной обмотке приводит к значительному изменению как передаточных функций по второй и четвертой гармоникам, так и формы сигнала на выходе феррозонда.

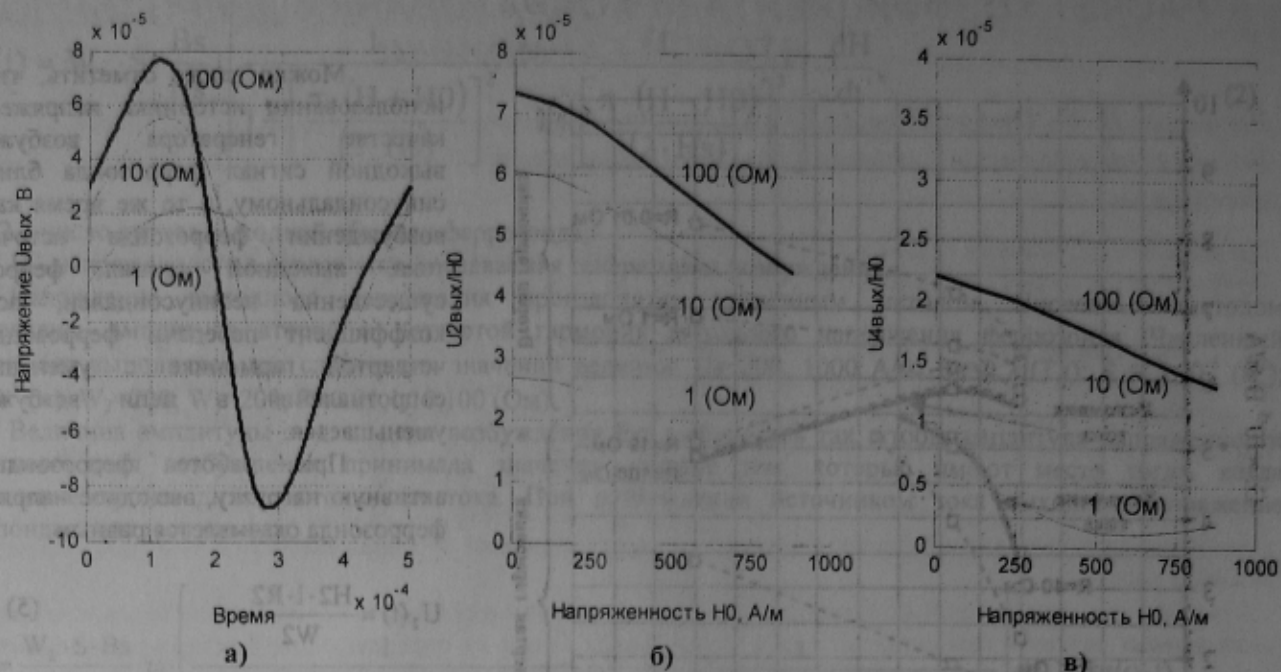


Рис. 3. – Зависимость сигнала на выходе феррозонда (а), передаточной функции по второй (б) и четвертой (в) гармоникам от сопротивления нагрузки R_2 ($R_1=0.1$ (Ом), $E_m=0,3$ (В), $H_s=1000$ А/м)

Таким образом, проведенный анализ режима работы феррозонда при различных параметрах генератора возбуждения позволяет сделать следующие выводы:

- величина внутреннего сопротивления генератора оказывает существенное влияние на коэффициент преобразования феррозонда второй гармонике;
- использование в качестве генератора возбуждения источника синусоидального напряжения вместо синусоидального источника тока увеличивает коэффициент преобразования феррозонда по второй гармонике в 1,15 – 1,6 раза.
- использование в качестве генератора возбуждения источника синусоидального напряжения уменьшает коэффициент преобразования сигнала по четвертой гармонике в 2 – 2.5 раза.
- передаточные функции по второй и четвертой гармоникам значительно уменьшаются при уменьшении сопротивления нагрузки. При этом форма сигнала становится отличной от синусоидальной.

Рекомендовано до друку д.т.н. проф. Ковальовим О.П.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю. В. Феррозонды, М.: «Энергия», 1969, 165с.
2. Спектор Ю. И. К применению магнитомодуляционных датчиков типа второй гармонике в качестве градиентометров//Труды института физики металлов. Вып.21, 1959, с.301-304.
3. Жученко Н. А., Черелахин Г. А., Тахафер Басин. Расчет функции преобразования феррозонда второй гармонике с учетом внутреннего сопротивления генератора возбуждения. 3-я международная конференция «Метрология и измерительная техника (Метрология – 2002), том 1», Харьков, 2002 с.21-24.