УДК 620.179.14

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ФЕРРОЗОНДА ПРИ ОДНОПОЛЯРНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

В. С. Безкоровайный, к.т.н., доцент кафедры «Электромеханика» ЛНУ им. В. Даля, Луганск; orcid.org/0000-0002-8737-7318, e-mail: Volk 7@ukr.net

Ю. В. Ливцов, аспирант кафедры «Электромеханика», ЛНУ им. В. Даля, Луганск;

orcid.org/0000-0001-8747-7132, e-mail: Liwtsoff@yandex.ua

В. В. Яковенко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика», ЛНУ им. В. Даля, Луганск; orcid.org/0000-0003-3837-035X, e-mail: el mex@rambler.ru

Н. А. Шатова, к.т.н., доцент кафедры «Электромеханика» ЛНУ им. В. Даля, Луганск; orcid.org/0000-0002-3487-8191, e-mail: nzhuchenko@mail.ru

Рассмотрена математическая модель образования выходного сигнала ферромодуляционного damчика при однополярном импульсном возбуждении. При применении феррозондов в качестве damчиков механических величин (частота вращения, целостность зубчатых колес и т.п.), одним из основных требований является помехоустойчивость в присутствии высокого уровня электромагнитных помех. Целью работы является получение функции преобразования датчика, которая позволяет определить параметры выходного сигнала и их зависимость от амплитуды импульса возбуждения, а также от магнитных и геометрических параметров сердечников. Результаты численных экспериментов указывают на возможность увеличения коэффициента преобразования датчика с однополярным импульсным возбуждением. В результате получаем то, что однополярное импульсное возбуждение ферромодуляционного датчика позволяет значительно упростить схему генератора возбуждения и схему обработки сигнала.

Ключевые слова: датчик, сердечник, магнитная проницаемость, обмотка возбуждения, дифференциальное уравнение, функция преобразования, обмотка, полярность сигнала.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-190-197

Введение

При использовании феррозондов в качестве датчиков механических величин (ферромодуляционных датчиков), таких как частота вращения зубчатых колес, смещение относительно друг друга ферромагнитных деталей, целостности ферромагнитных деталей, одним из основных требований является помехоустойчивость в присутствии высокого уровня электромагнитных помех и т.п. [1]. Это требование можно выполнить путем увеличения коэффициента преобразования феррозонда, за счет чего повышается энергетический уровень выходного сигнала датчика. При этом порог чувствительности может быть выше, чем у феррозондов второй гармоники (10^{-5} Тл). Магнитные системы ферромодуляционных датчиков (ФМД) могут иметь различную конфигурацию: стержневую, кольцевую, с дополнительныммагнитопроводом.

Целесообразным является для феррозондов, используемых в качестве датчиков механических величин [1], а в некоторых случаях при магнитном неразрушающем контроле [2], применять режим однополярного импульсного возбуждения [3]. Режим однополярного импульсного возбуждения обеспечивает ФМД высокий коэффициент преобразования и простую схему обработки выходных сигналов и генератора возбуждения. По сравнению с традиционным режимом второй гармоники однополярное импульсное возбуждение ФМД делает возможным осуществлять контрольные операции в условиях промышленного производства.

В литературных источниках [3, 4] нет сведений о теоретических исследованиях предлагаемого режима работы ФМД, поэтому в статье приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований режима однополярного импульсного возбуждения феррозонда, используемого в ФМД.

Цель работы – определение функции преобразования феррозонда при однополярном импульсном возбуждении.

Теоретическая часть

Принцип работы ФМД иллюстрируется магнитной системой, показанной на рисунке 1, которая, по сути, представляет собой модулятор, встроенный в магнитную цепь датчика. Магнитная цепь может иметь различную конфигурацию и размеры от стержневого варианта до кольца [5].



Рисунок 1 – Магнитная система ФМД Figure 1 – FMD magneticsystem

Электрическая принципиальная схема ФМД, для которой определяется функциональная зависимость между амплитудой выходного сигнала ФМД и напряженностью измеряемого поля, показана на рисунке 2.



Рисунок 2–Электрическая принципиальная схема ФМД Figure 2 – Electrical schematic diagram of the FMD

При построении упрощенной математической модели функции преобразования делаются следующие допущения: не учитывается гистерезис магнитного материала сердечников, действие вихревых токов учитывается сопротивлением R_1 , используется кусочно-линейная аппроксимация кривой намагничивания сердечника, сопротивление нагрузки феррозонда считается активным.

Кривая намагничивания полуэлементов ФМД аппроксимируется двумя прямыми линиями (рисунок 3), при $H < H_s \ B = \mu_0 \mu_m H$, при $H > H_s \ B = \mu_0 \mu_s H$.

Для расчета функции преобразования феррозонда используется среднее значение проницаемости за цикл перемагничивания сердечников, которое считается равным

$$\mu_{cp1} = \frac{1}{H_m} \Big[H_S \mu_m + H_m \mu_S - (\mu_m + \mu_S) H_0 \Big];$$

$$\mu_{cp2} = \frac{1}{H_m} \Big[H_S \mu_m + H_m \mu_S + (\mu_m - 2\mu_S) H_0 \Big].$$
(1)

здесь H_s – напряженность насыщения сердечника; μ_m – магнитная проницаемость сердечника; μ_s – магнитная проницаемость насыщения; H_0 – напряженность насыщения сердечника; H_m – максимальная напряженность насыщения.



Рисунок 3–Аппроксимация функции B(H) и $\mu(H)$ Figure 3 – Approximation of the function B(H) and $\mu(H)$

Согласно формулам (1) средняя магнитная проницаемость сердечников феррозондов зависит не только от магнитного материала и геометрических параметров сердечников, но и от величины напряженности измеряемого поля и также от величины напряженности поля возбуждения феррозонда.

В обмотку возбуждения феррозонда подается импульс напряжения длительностью t_u и амплитудой U, в результате чего ток в обмотке возбуждения определяется путем решения уравнения (2). Расчет ведется при $R_2 = \infty$, то есть при холостом ходе ФМД.

$$\left(L_{i}'+L_{i}''\right)\frac{di_{i}}{dt}+i_{i}R_{i}=u_{i}(t),$$
(2)

где $L'_{l} = \frac{\mu_{0}\mu_{cp1}w_{l}^{2}S}{l}$, $L''_{l} = \frac{\mu_{0}\mu_{cp2}w_{l}^{2}S}{l}$ или $L'_{l} = L_{0}\mu_{cp1}$, $L''_{l} = L_{0}\mu_{cp2}$; $L_{0} = \frac{\mu_{0}W^{2}S}{l}$; $L_{1} = L'_{1} + L''_{1} = 2L_{0}\left(\mu_{cp1} + \mu_{cp2}\right)$; $S = 2a \cdot h$; R_{1} – активное сопротивление обмотки возбуждения, $u(t) = \begin{cases} U \ npu \ 0 < t \le t_{u} \\ 0 \ npu \ t > t_{u} \end{cases}$.

Решением уравнения (2) будут функции

$$i_{I} = \frac{U}{R} \left(I - e^{-\frac{t}{\tau_{I}}} \right), \tag{3}$$

$$\tau_{I} = \frac{L_{0}\left(\mu_{cp1} + \mu_{cp2}\right)}{R_{I}}, \text{ при } 0 < t \le t_{u}$$
$$i = i_{m}e^{-\frac{t}{\tau_{I}}}, \tag{4}$$

здесь $i_m = \frac{U}{R} \left(I - e^{-\frac{t_u}{\tau_I}} \right).$

Выходное напряжение феррозонда рассчитывается по следующим формулам: при $t_{\mu} \ge t \ge 0$

$$u_{2x} = \left(L'_2 - L''_1\right) \frac{di}{dt} = U_1 \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{\mu_{cp1} - \mu_{cp2}}{\mu_{cp1} + \mu_{cp2}} e^{-\frac{t}{\tau_1}},$$
(5)

при $t > \tau_1$

$$u_{2x} = -i_m R_I \frac{w_2}{w_I} \cdot \frac{\mu_{cp1} - \mu_{cp2}}{\mu_{cp1} + \mu_{cp2}} e^{-\frac{t - t_u}{\tau_I}}.$$
(6)

Таким образом, входной сигнал феррозонда с однополярным импульсным возбуждением рассчитывается по формуле при $t_u \ge t \ge 0$

$$u_{2x} = U_I \frac{w_2}{w_I} \frac{\left(2\mu_m - \mu_S\right)H_0}{2\left(H_S\mu_m + H_m\mu_S\right) - H_0\mu_S} e^{-\frac{t}{\tau_I}};$$
(7)

при $t > t_u$

$$u_{2x} = -i_m R_I \frac{w_2}{w_I} \frac{\left(2\mu_m - \mu_S\right) H_0}{2\left(H_S \mu_m + H_m \mu_S\right) - H_0 \mu_S} e^{-\frac{t - t_u}{\tau_I}}.$$
(8)

Поскольку $\mu_m >> \mu_s$, а H_m не намного превышает $H_s(H_m \approx l, 5H_s)$, формулы в первом приближении равны:

при $t_u \ge t \ge 0$

$$u_{2x} \approx U_I \frac{w_2}{w_I} \cdot \frac{H_0}{H_S} e^{-\frac{t}{\tau_u}};$$
(9)

при $t > t_u$

$$u_{2x} \approx -i_m R_I \frac{w_2}{w_I} \cdot \frac{H_0}{H_S} e^{-\frac{t-t_u}{\tau_u}}.$$
(10)

Таким образом, максимальное значение выходного напряжения феррозонда, которое является его информационным сигналом пропорционально амплитуде однополярного импульса возбуждения и коэффициентом преобразования феррозонда можно считать величину

$$k_{\phi} \approx \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{I}{H_s} U_1. \tag{11}$$

Коэффициент преобразования ФМД второй гармоники, равный [1]

$$k_{\phi} \approx 4 f S W_2 \mu_0 \mu$$

где *f* – частота возбуждения, меньше импульсного в среднем на два порядка.

В дальнейшем определяется выходное напряжение с учетом влияния сопротивления нагрузки R_2 . Эквивалентная схема выходной цепи показана на рисунке 4, индуктивность L_2

равна $L_2 = L_2' + L_2'' = L_{02} \left(\mu_{cp1} + \mu_{cp2} \right) \approx 2L_{02} \mu_m$, $L_{02} = \frac{\mu_0 W_2^2 S}{l}$.

Рисунок 4 – Эквивалентная схема выходной цепи феррозонда Figure 4 – Equivalent diagram of the output circuit of the ferroprobe

Выходное напряжение феррозонда, нагруженного сопротивлением R_2 , рассчитывается с помощью интеграла Дюамеля. Обозначается $\alpha = \frac{R_1}{L_1}$; $\beta = \frac{R_2}{L_2}$, тогда выходное напряжение феррозонда при $t_{\mu} \ge t \ge 0$ рассчитывается по следующей формуле

$$u_{2} = u_{2x}(0)h(t) + \int_{0}^{t} u_{2x}'h(t-\tau)d\tau = U_{2x}(1-e^{-\beta t}) + \int_{0}^{t} (U_{2x}e^{-\alpha t})'(1-e^{-\beta(t-\tau)})d\tau =$$

$$= -U_{2x}\frac{\beta}{\alpha-\beta}(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}),$$
(12)

здесь $U_{2x} = U_I \frac{W_2}{W_I} \frac{H_0}{H_S};$

при $t > t_u$

$$u_{2} = u_{2x}(0)h(t) + \int_{0}^{t} u_{2x}'(\tau)h(t-\tau)d\tau - \left[u_{2x}(t_{u}) - u_{3x}(t_{u})\right]h(t-t_{u}) +$$

$$+ \int_{t_{u}}^{t} u_{3x}'(\tau)h(t-\tau)d\tau = U_{2x}\left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t_{u}}\right) - \frac{\alpha}{\alpha - \beta}U_{2x}e^{-\beta t}\left(e^{-(\alpha - \beta)t} - I\right) -$$

$$- \left(U_{2x}e^{-\alpha t_{u}} + i_{m}R_{I}\right)\left[I - e^{-\beta(t-t_{u})}\right] - i_{m}R_{I}e^{\alpha t_{u}}e^{-\beta t}\left(e^{-(\alpha - \beta)t} - e^{-(\alpha - \beta)t_{u}}\right)\frac{\alpha}{\alpha - \beta}.$$
(13)

Результаты численных экспериментов

В численных экспериментах использовался ФМД со стержневыми сердечниками с геометрическими параметрами l = 20 мм – длина сердечников, 2a = 2 мм – ширина сердечников, h = 0.05 мм – толщина сердечников [6, 7]. Магнитная проницаемость формы рассчитывалась по формуле [1]

$$m = \frac{0,25\pi \left(l^2 - 0,25l_w^2\right)}{2ah \left(ln\frac{3,6\cdot l}{h+2a} - l\right)},$$

где l_w – для сердечников.

Магнитная проницаемость сердечников определялась по формуле

$$\mu = \frac{\mu_m \cdot m}{\mu_m + m - l} \approx m$$

где μ – магнитная проницаемость материала сердечников.

Число витков обмотки возбуждения $W_1 = 200$ витков, выходной обмотки $W_2 = 200$ витков. Длительность импульсов возбуждения $t_u = 1, 5, 10$ мкс, амплитуда импульсов $U_1 = 20$ В. Напряженность измеряемого поля $H_0 = 1, 5, 10$ А/м. Сопротивление цепи возбуждения $R_1 = 10$ Ом, сопротивление нагрузки $R_2 = 500$ Ом.

Информационным параметром выходного сигнала ФМД является амплитуда положительного импульса. Обратный выброс имеет амплитуду меньшую, чем прямой выброс выходного сигнала ФМД, что простым способом позволяет определить полярность измеряемой напряженности магнитного поля.

Численные эксперименты показали, что результаты расчетов выходного напряжения по формулам (7) и (8) практически совпадают с результатами определенными по формулам (5) и (6). Установлено также, что с увеличением амплитуды импульса возбуждения увеличивается разница между амплитудами положительного и отрицательного сигналов.

На рисунке 5 приведены выходные импульсы ФМД при различных значениях магнитной напряженности измеряемого поля. Амплитуды импульсов прямо пропорциональны измеряемой напряженности. Импульсы отрицательной полярности в 10-20 раз меньше положительной, что позволяет простым методом определять полярность измеряемого поля.



Рисунок 5– Выходной сигнал ФМД при различных значениях измеряемой напряженности Figure 5 – The output signal of the FMD at various values of the measured intensity

На рисунке 6 показаны графики выходного сигнала ФМД при измерении длительности импульса возбуждения от 1 мкс до 10 мкс. С уменьшением длительности импульса возбуждения увеличивается обратный уровень сигнала, при практически неизменной форме положительного выходного сигнала.



Рисунок 6– Влияние длительности импульса возбуждения на форму выходного сигнала Figure 6 – Effect of the excitation pulse duration on the shape of the output signal

Статическая характеристика ФМД с однополярным импульсным возбуждением приведена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Статические характеристики ФМД с однополярным импульсным возбуждением Figure 7 – Static characteristics of FMD with unipolar pulsed excitation

Экспериментальные исследования

При натурном эксперименте ФМД с указанными при численном расчете параметрами и режимом работы были помещены в однородное магнитное поле соленоида, их выходной сигнал измерялся вольтметром «пик»-типа. При эксперименте было установлено, что данные полученные расчетным путем отличаются от результатов численного эксперимента не более чем на 14-18 %.

Заключение

1. Коэффициент преобразования ФМД прямо пропорционален амплитуде импульса возбуждения, поэтому на два порядка выше коэффициента преобразования ФМД второй гармоники.

2. Однополярное импульсное возбуждение ФМД позволяет значительно упростить схемы генератора возбуждения и обработки сигналов.

Библиографический список

1. Афанасьев Ю. В. Ферозондовые приборы / Ю.В. Афанасьев. Л.: Энергоатомздат, 1986.

2. Загидулин Р. В. Распознавание дефектов сплошности в ферромагнитных изделиях: дис. ... доктора техн. наук: 05.11.13 / Р.В. Загидулин. Уфа, 2001. 412 с.

3. **Яковенко В. В., Павлюков В. Ф., Воробьёв Н. Г.** К расчёту коэффициента преобразования магнитомодуляционных измерительных преобразователей с импульсным возбуждением // Приборостроение. – 1983. № 5. – С. 32-36.

4. **Яковенко В. В.** Измерение напряжённости поля в зазоре магнитного датчика феррозондом «пик»-типа // Приборостроение.1983. № 10. С. 15-19.

5. Безкоровайный В.С. Математическое моделирование измерительного тракта дефектферрозонд / В.С. Безкоровайный, В.В. Яковенко, С.Н. Швец // НауковіпраціДонНТУ. Серія «Обчислюванатехніка та автоматизація». № 1 (28), 2015 С. 231-240.

6. Безкоровайный В. С. Повышение помехоустойчивости феррозондовых дефектоскопов к магнитным полям помех: дис. ... канд. техн. наук. – Северодонецк, 2015. – 170 с.

7. Безкоровайный В. С. Функция преобразования феррозонда с однополярным импульсным возбуждением / В.С. Безкоровайный, О.В. Тарасенко, В.В. Яковенко, А.А. Ивженко // Вестник ЛНУ им. В. Даля. 2018, № 4 (10), 187 с.

UDC 620.179.14

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF THE OUTPUT SIGNAL FORMATION OF FERROPROBE UNDER SINGLE-POLARITY PULSE EXCITATION

V. S. Bezkorovainyi, Ph.D. (Tech.), Associate Professor, department, LNU. V. Dalya, Lugansk;

orcid.org/0000-0002-8737-7318, e-mail: Volk_7@ukr.net

Y. V. Livcov, postgraduate student, LNU. V. Dalya, Lugansk;

orcid.org/0000-0001-8747-7132, e-mail: Liwtsoff@yandex.ua

V. V. Yakovenko, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of «Electromechanics» Department, LNU. V. Dalya, Lugansk;

orcid.org/0000-0003-3837-035X, e-mail: el mex@rambler.ru

N. A. Shatova, Ph.D. (Tech.), Associate Professor, Electromechanics department, LNU. V. Dalya, Lugansk; orcid.org/0000-0001-8747-7132, orcid.org/0000-0002-3487-8191, e-mail: nzhuchenko@mail.ru

The article considers a mathematical model of the forming output signal of ferromodulation sensor using single-polarity pulse excitation. One of the main requirements upon applying ferroprobes as sensors of mechanical quantities (rotational speed, gears integrity, etc.) is noise immunity in the presence of a high level of electromagnetic interference. **The aim of the article** is to obtain conversion function of the sensor that allows you to determine the parameters of output signal and their dependence on the amplitude of excitation pulse, as well as on magnetic and geometric parameters of the cores. The results of numerical experiments indicate the possibility to increase conversion coefficient of the sensor with unipolar pulsed excitation. As a result, we make the conclusion that unipolar pulsed excitation of ferromodulation sensor can significantly simplify the circuit of excitation generator and the circuit of signal processing.

Key words: sensor, core, magnetic permeability, field winding, differential equation, conversion function, winding, signal polarity.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-190-197

References

1. Afanas'ev Ju. V. *Ferozondovye pribory* (Flux-probe devices). Ju.V. Afanas'ev. L.: Jenergoatomzdat, 1986. (in Russian).

2. Zagidulin R. V. *Raspoznavanie defektov sploshnosti v ferromagnitnyhizdelijah*: dis. ... doktoratehn. nauk: 05.11.13. Zagidulin R.V. Ufa. 2001. 412 p.

3. Jakovenko V. V., Pavljukov V. F., Vorob'jov N. G. K raschjotu kojefficienta preobrazovanija magnetomoduljacionnyh izmeritel'nyhpreobrazovatelej s impul'snymvozbuzhdeniem. *Priborostroenie*. 1983, no. 5, pp. 32-36.

4. Jakovenko V. V. Izmerenie naprjazhjonnosti polja v zazore magnitnogo datchika ferrozondom «pik»-tipa. *Priborostroenie*. 1983, no. 1, pp. 15-19.

5. Bezkorovainyi V. S. Matematicheskoe modelirovanie izmeritel'nogo trakta defekt-ferrozond. V. S. Bezkorovajnyj, V. V. Jakovenko, S. N. Shvec. *NaukovipraciDonNTU*. Serija *«Obchisljuvanatehnika ta avtomatizacija»*. 2015, no. (28), pp. 231-240.

6. Bezkorovainyi V. S. Povyshenie pomehoustojchivosti ferrozondovyh defektoskopov k magnitnym poljam pomeh: dis. kand. tehn. nauk. Severodoneck. 2015, 170 p.

7. **Bezkorovainyi V. S.** Funkcija preobrazovanija ferrozonda s odnopoljarnym impul'snym vozbuzhdeniem. V.S. Bezkorovajnyj, O.V. Tarasenko, V.V. Jakovenko, A.A. Ivzhenko. *Vestnik LNU im. V. Dalja*. 2018, no. 4 (10). 187 p.