

*А.Н. Борисенко, канд. техн. наук, О.Ю. Кропачек, В.Г. Свистун*

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА ТОПЛИВОПОДАЧИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Зроблено аналіз роботи і визначена графоаналітичним методом оптимальна за чутливістю робоча частота електромагнітного датчика паливоподачі дизеля з обліком нелінійних кривих намагнічування, втрат на гістерезіс та вихрові токи сталі перетворювача.

Информация о параметрах впрыскивания топлива весьма важна для оценки технического состояния дизеля, автоматического управления режимами его работы и обеспечения высоких экологических и технико-экономических показателей агрегата. Такая информация может быть получена при обработке сигнала специального датчика, характеристики которого существенно влияют на качество упомянутой информации. В связи с этим важную роль играет, в том числе, и правильный выбор рабочей частоты датчика, при которой его чувствительность будет близка к максимально возможной.

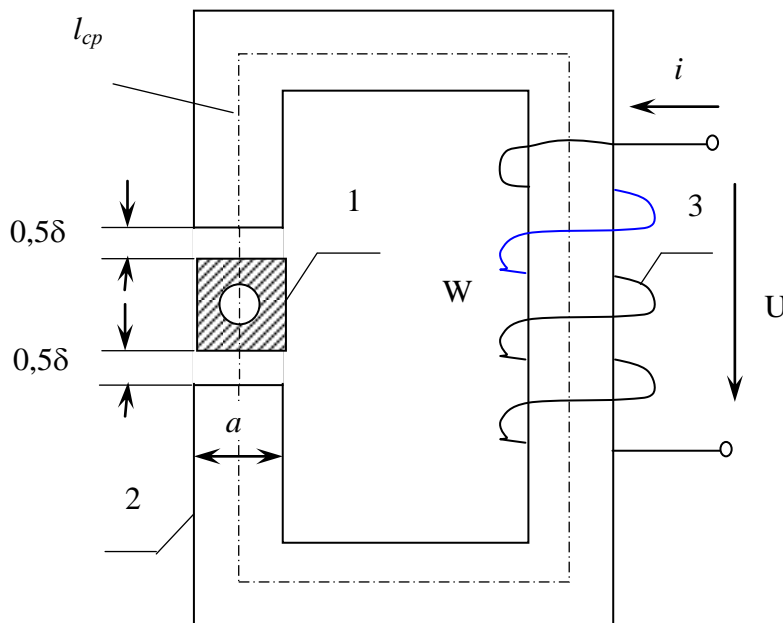


Рис.1

В качестве датчика впрыска топлива можно выбрать, например, электромагнитный преобразователь, который помещается вблизи диагностирующей форсунки таким образом, что небольшой участок топливопровода 1 располагается в рабочем зазоре магнитопровода 2 (рис.1). На обмотку 3 датчика подается переменное синусоидальное напряжение и выходным же сигналом

датчика является действующее или амплитудное значение тока обмотки, изменяющее-

ся при изменении зазора  $\delta$ , которое вызвано деформациями топливопровода в процессе топливоподачи.

Схему замещения электромагнитного преобразователя согласно [1] можно представить в виде последовательной цепи, показанной на рис.2.

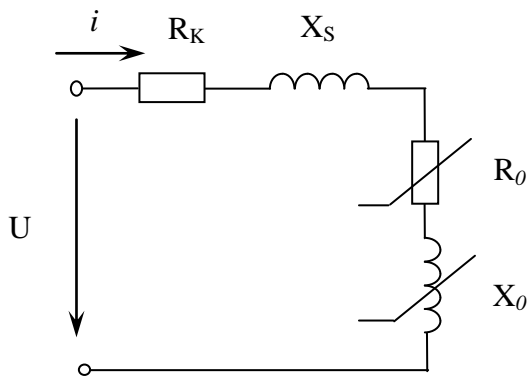


Рис.2

Цепь нелинейная и ее строгий анализ крайне затруднителен, в связи с чем будем пользоваться приближенными графоаналитическими методами. Кроме того, для упрощения задачи принимаем следующие допущения: 1) ток в обмотке датчика синусоидален; 2) температура датчика постоянна; 3) потоки выпучивания в воздушных зазорах отсутствуют; 4) магнитные свойства материала топливопровода не оказывают существенно-

го влияния на характеристики магнитной цепи собственно преобразователя; 5) топливопровод расположен посередине рабочего зазора датчика; 6) обмотка выполнена так, что реактивные сопротивления рассеяния много меньше реактивного сопротивления намагничивания,  $X_s \ll X_0$ .

Действующее значение тока в обмотке преобразователя согласно закону Ома можно записать как:

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_k + R_0)^2 + X_0^2}}, \quad (1)$$

где  $R_k$  – активное сопротивление обмотки;  $R_0$  – активное сопротивление, соответствующее потерям в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи;  $X_0 = \omega L_0$ ,  $L_0$  – индуктивность намагничивания.

Величину  $L_0$  согласно [1] выразим следующим образом:

$$L_0 = \frac{W^2}{R_{\text{магн}}} = \mu_0 S W^2 \left( \frac{l_{\text{ср}}}{\mu} + \delta \right), \quad (2)$$

где  $W$  – число витков обмотки датчика;  $R_{\text{магн}}$  – магнитное сопротивление цепи;  $S$  – поперечное сечение магнитопровода;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  – магнитная постоянная вакуума;  $l_{\text{ср}}$  – длина средней магнитной силовой линии магнитопровода;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода;  $\delta$  – величина воздушного зазора между топливопроводом и магнитопроводом.

С учетом (2) выражение (1) можно привести к виду:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left( \frac{\omega K_2}{K_1 + \delta} \right)^2}}, \quad (3)$$

где  $R = R_k + R_0$ ;  $K_1 = \frac{I_{cp}}{\mu}$ ;  $K_2 = W^2 \mu_0 S$ .

Приращения действующего значения тока  $\Delta I$ , вызванные изменениями воздушного зазора  $\Delta \delta$ , запишем следующим образом:

$$\Delta I = \frac{\partial I}{\partial \delta} \Delta \delta = A \Delta \delta,$$

где  $A$  – чувствительность датчика, получаемая после дифференцирования соотношения (3) по переменной  $\delta$ .

$$A = \frac{U \omega K_2}{(K_1 + \delta)^3 \left[ R^2 + \left( \frac{\omega K_2}{K_1 + \delta} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (4)$$

Из последней формулы видно, что чувствительность датчика равна нулю при  $\omega = 0$  и  $\omega \rightarrow \infty$ . Следовательно, при какой-то частоте  $\omega_0$  из диапазона  $0 < \omega < \infty$  чувствительность максимальна. Для ее определения продифференцируем (4) по частоте и решим уравнение  $\frac{\partial A}{\partial \omega} = 0$ . В результате получим

$$\omega_0 = \frac{(R_k + R_0) \left( \delta + \frac{I_{cp}}{\mu} \right)}{\sqrt{2} W^2 \mu_0 S}; \quad (5)$$

Переменные  $R_0$  и  $\mu$  зависят от  $\omega$  и индукции  $B$  в магнитопроводе, в связи с чем точное решение уравнения (5) невозможно и будем искать приближенное значение  $\omega_0$ . Для этого вначале с учетом работы [2] запишем

$$R_0 = \frac{P_{зад}}{I^2} G \left( \frac{B_{max}}{B_{зад}} \right)^2 \left( \frac{\omega}{\omega_{зад}} \right)^{1,2}; \quad (6)$$

где  $P_{зад}$  – заданные потери на гистерезис и вихревые токи на единицу массы материала при заданных индукции  $B_{зад}$  и частоте  $\omega_{зад}$ ;  $B_{max} = \sqrt{2} B$  – амплитудное значение индукции;  $G$  – масса магнитопровода.

В [3] выбраны  $B_{зад} = 1$  Тл,  $\omega_{зад} = 314$  рад/с. Величина  $\mu$  может быть определена по магнитной характеристике  $B(IW)$  всей цепи, построенной с учетом кривой намагничивания  $B(H)$  материала магнитопровода [1]. При этом используются законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей и полученный с их помощью следующий алгоритм расчета

$$\Phi \rightarrow \frac{\Phi}{S} = B(H) \quad (7)$$

где  $\Phi$  – действующее значение магнитного потока в цепи;  $H_{ст}$  – напряженность магнитного поля в магнитопроводе;  $H_{\delta}$  – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре.

На рис. 3 приведена кривая  $B(H)$  для стали Э320 [2,3].

На рис. 4 показана магнитная характеристика  $B(IW)$ , построенная по данным со-

ответствующей таблицы. Последняя получена в соответствии с (7) при следующих конструктивных данных преобразователя, выбранных авторами в качестве примера:  $S = 10^4 \text{ м}^2$ ;  $a = 0,01 \text{ м}$ ;  $l_{cp} = 0,1 \text{ м}$ ;  $\delta = 10^{-3} \text{ м}$ ;  $W = 1000$ .

Выражение (5) с учетом (2) удобно записать в виде  $\omega_0 = \frac{(R_k + R_0)R_{\text{магн}}}{\sqrt{2}W^2}$  или следующим образом  $\omega_0 = \frac{R_k + R_0}{\sqrt{2}L_0}$ .

Если принять во внимание (6), получим

$$\omega_0 = \frac{R_0 + \frac{P_{\text{зад}}}{I} G \left( \frac{B_{\text{max}}}{B_{\text{зад}}} \right)^2 \left( \frac{\omega_0}{\omega_{\text{зад}}} \right)^{1,2}}{\sqrt{2}L_0} \quad (8)$$

Уравнение (8) удобно решить, например, численными методами с использованием графика  $V(IW)$ , показанного на рис. 4. При этом можно варьировать  $R_k$ ,  $I$  или только  $I$ , считая  $R_k = \text{const}$ . Активное сопротивление катушки при известных  $\rho$  и  $d_{\text{пр}}$  можно определить по формуле [3]:

$$R_k = 4\rho \frac{C_{\text{пр}} W}{\pi d_{\text{пр}}^2},$$

где  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление материала провода;  $C_{\text{пр}}$  - средняя длина витка;  $d_{\text{пр}}$  - диаметр провода.

После вычисления  $\omega_0$  можно определить и рабочее напряжение преобразователя на основании формулы (1). В частности, при вышеуказанных значениях конструктивных параметров датчика и рабочем токе  $I = 0,02 \text{ А}$  оптимальная частота  $\omega_0 = 104200 \text{ рад/с}$ , а напряжение  $U = 74 \text{ В}$ . Эти данные удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента, выполненного с использованием описанного датчика при диагностировании топливной аппаратуры дизелей D100, D70 и D80.

$\Phi$ , Вб	$B$ , Тл	$H_{\text{ст}}$ , А/м	$H_{\delta}$ , А/м	$H_{\text{ст}}l_{\text{ст}}$ , А	$H_{\delta}\delta$ , А	$(H_{\delta}\delta + H_{\text{ст}}l_{\text{ст}})$ , А	$I$ , А	$R_{\text{магн}}$ , 1/Гн	$L_0$ , Гн
$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,0	$14 \cdot 10^3$	$796 \cdot 10^3$	1400	796	2156	2,156	$21,56 \cdot 10^6$	0,0464
$0,8 \cdot 10^{-4}$	0,8	$13 \cdot 10^3$	$637 \cdot 10^3$	1300	637	1937	1,937	$24,21 \cdot 10^6$	0,0413
$0,6 \cdot 10^{-4}$	0,6	$11,3 \cdot 10^3$	$477,7 \cdot 10^3$	1130	477,7	1607,7	1,607	$26,8 \cdot 10^6$	0,0373
$0,4 \cdot 10^{-4}$	0,4	$9 \cdot 10^3$	$318,5 \cdot 10^3$	900	318,5	1218,5	1,218	$30,46 \cdot 10^6$	0,0328
$0,2 \cdot 10^{-4}$	0,2	$6 \cdot 10^3$	$159,3 \cdot 10^3$	600	159,3	759,3	0,759	$37,96 \cdot 10^6$	0,0263
$0,1 \cdot 10^{-4}$	0,1	$1,7 \cdot 10^3$	$79,6 \cdot 10^3$	170	79,6	249,6	0,249	$24,96 \cdot 10^6$	0,04
$0,05 \cdot 10^{-4}$	0,05	$1 \cdot 10^3$	$39,8 \cdot 10^3$	100	39,8	139,8	0,140	$27,96 \cdot 10^6$	0,0358

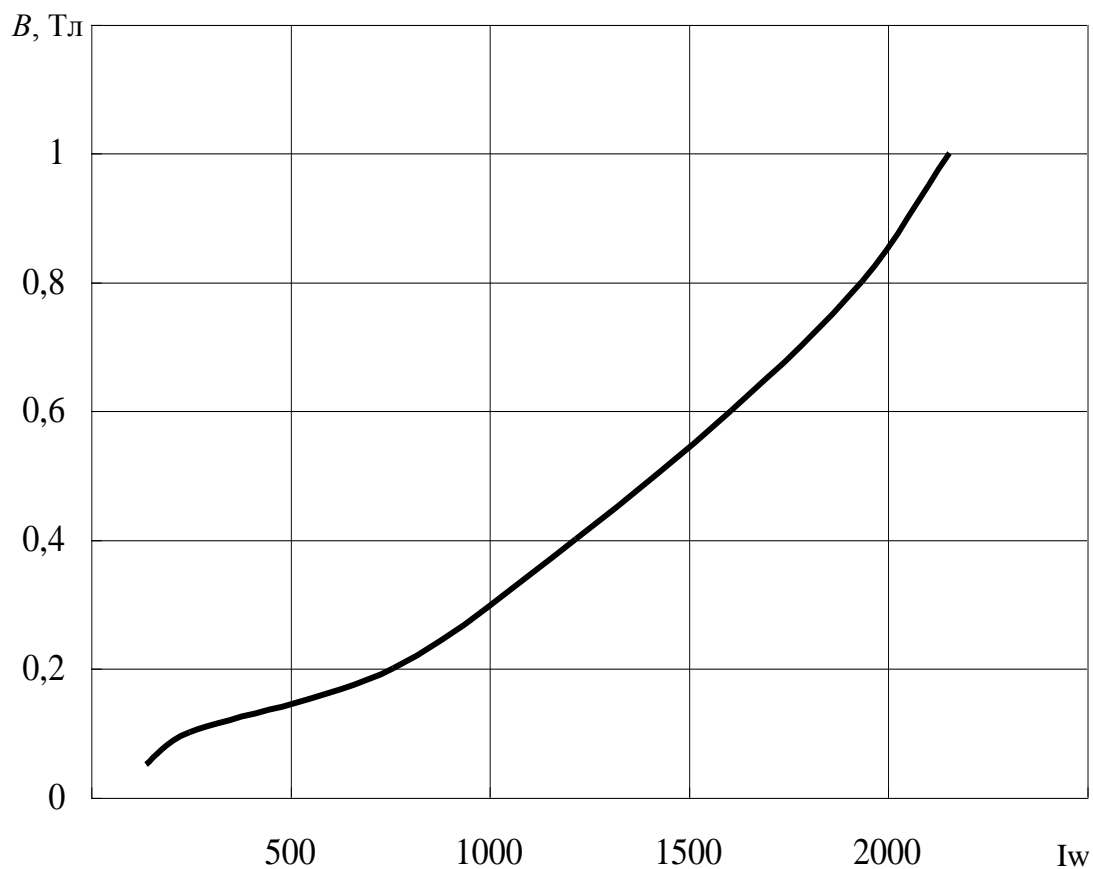


Рис.4

**Список литературы:** 1. *Нейман Л.Р., Демирчан К.С.* Теоретические основы электротехники. Ч.3,4. Т.2 – Л.: Энергия, 1967.- 407 с. 2. *Полищук Е.С.* Измерительные преобразователи. – Киев: Вища школа. Головное издательство, 1981.- 296 с.3. *Таев И.С.* Электрические аппараты. Общая теория. – М.: Энергия, 1977.- 272 с.

*Поступила в редколлегию 18. 02. 99*

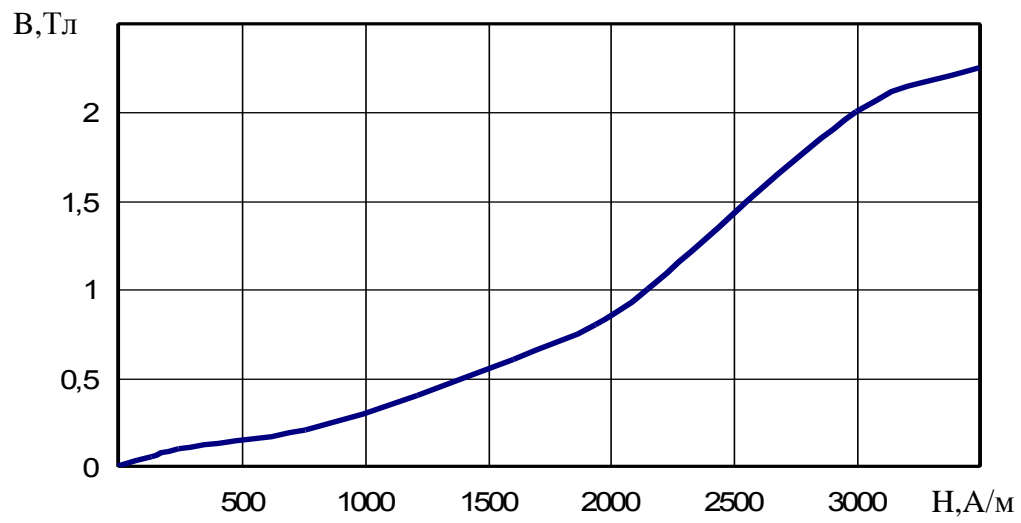


Рис. 3