

*А.Н. БОРИСЕНКО*, д-р техн. наук, доц.НТУ "ХПИ"

*Б.И.КУБРИК*, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПИ"

*Е.Е.СВЕТЛИЧНАЯ*, ст.-преподаватель, НТУ "ХПИ"

*А.Н.СЕРГИЕНКО*, аспирант НТУ "ХПИ"

*А.Б. БОГАЕВСКИЙ*, д-р техн. наук, проф. ХНАДУ

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ДАТЧИКА ТОПЛИВОПОДАЧИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА.**

У статті аналізується робота електромагнітного датчика топливоподачі дизеля і пропонується методика отримання його максимальної чутливості за рахунок оптимізації частоти живлячої синусоїдальної напруги.

In the article work of electromagnetic sensor of топливоподачі diesel is analysed and methodology of receipt of his maximal sensitiveness is offered due to optimization of frequency of feed-in sinewave tension.

**Постановка проблеми:** параметри топливоподачі являється весьма важными для систем управления и диагностики двигателей внутреннего сгорания и, в частности дизелей, и вопросы их определения актуальны и важны [1 – 2].

**Анализ литературы** показывает, что как правило момент начала и продолжительность впрыска топлива определяется по сигналу датчика перемещения иглы форсунки [3], по параметрам импульса управления электромагнитной форсункой[4 – 6], или по сигналу пьезодатчика, установленного на корпусе форсунки. В первом случае не всегда имеется технологическая возможность доступа к игле форсунки, во втором – имеет место существенная погрешность вследствие запаздывания движения иглы форсунки относительно импульса управления, а в третьем – возникают трудности выделения полезного сигнала на фоне помех, связанных с вибрацией форсунки на работающем двигателе даже при ее неподвижной игле. Во всех рассмотренных случаях точность определения параметров топливоподачи неудовлетворительная, улучшить ее за счет повышения чувствительности датчика достаточно сложно.

**Цель статьи** – обеспечить максимально высокую чувствительность датчика топливоподачи и за счет этого повысить его точность.

В качестве датчика впрыска топлива выбран электромагнитный преобразователь, который помещается вблизи диагностируемой форсунки таким образом, что небольшой участок топливопровода  $l$  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, изменяющееся при изменении зазора  $\delta$ , которое вызвано деформациями топливопровода в процессе топливоподдачи.

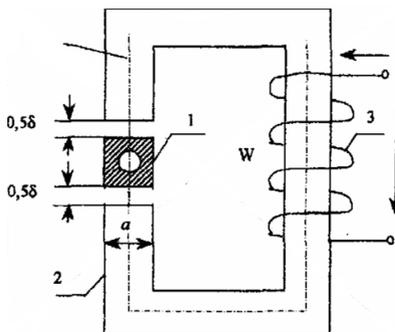


Рис. 1 Схема электромагнитного датчика топливоподдачи.

Схему замещения электромагнитного преобразователя согласно [8] можно представить в виде последовательной цепи, показанной на рис. 2.

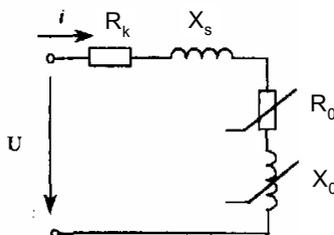


Рис. 2. Последовательная эквивалентная схема датчика топливоподдачи.

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 существенного 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 определяется:

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

где  $R_x$  – 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 [9] выразим следующим образом:

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

где  $W$  - число витков обмотки датчика;

$R_{\text{магн}}$  - магнитное сопротивление цепи;

$S$  - поперечное сечение магнитопровода;

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная вакуума;

$\ell_{\text{ср}}$  - 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  $R = R_x + R_0$ ;  $K_1 = \frac{\ell_{\text{ср}}}{\mu}$ ;  $K_2 = W^2 \mu_0 S$ .

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

$$\Delta I = \frac{dI}{d\delta} \Delta\delta = A \Delta\delta,$$

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  $\frac{dA}{d\omega} = 0$ . В результате получим

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

Переменные  $R_0$  и  $\mu$  зависят от  $\delta$  и индукции  $B$  в магнитопроводе, в связи с чем точное решение уравнения (5) невозможно, и поэтому будем искать приближенное значение  $\omega_0$ . Для этого вначале с учетом работы [10] запишем

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

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.

Величина  $\mu$  может быть определена по магнитной характеристике  $B(IW)$  всей цепи, построенной с учетом кривой намагничивания  $B(H)$  материала магнитопровода. 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;

$B(H)$  – зависимость индукции от напряженности магнитного поля;

$S$  - сечение магнитопровода.

$$B(H) \rightarrow H_{cm} \rightarrow H_{cm} \cdot \ell_{cp},$$

где  $H_{cm}$  - напряженность магнитного поля в магнитопроводе;  
 $\ell_{cp}$  - длина средней силовой линии.

$$B(H) \rightarrow H_{\delta} = \frac{B}{\mu_0 \mu} \rightarrow H_{\delta} \cdot \delta,$$

где  $H_{\delta}$  - напряженность магнитного поля в воздушном зазоре;  
 $B$  - индукция;  
 $\mu_0$  - магнитная постоянная вакуума;  
 $\delta$  - величина воздушного зазора.

$$H_{cm} \cdot \ell_{cp} + H_{\delta} \cdot \delta = IW,$$

где  $I$  - ток в обмотке;  
 $W$  - число витков в обмотке.

На рис. 4 приведена кривая  $B(H)$  стали Э320 [11].

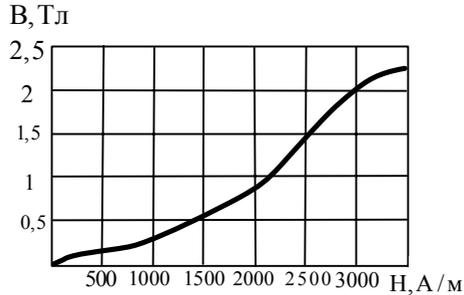


Рис. 3. Кривая намагничивания для материала датчика.

На рис. 4 показана магнитная характеристика  $B(IW)$ , построенная по данным соответствующей таблицы. Последняя получена в соответствии с (4.32) при следующих конструктивных данных преобразователя, выбранных авторами в качестве примера:

$$S = 10^{-4} \text{ м}^2; a = 0,01 \text{ м}; \delta = 10^{-3} \text{ м}; W = 1000.$$

Выражение (5) с учетом (2) удобно записать в виде

$$\omega_0 = \frac{(R_k + R_0) R_{\text{магн}}}{\sqrt{2} W^2 S}$$

или следующим образом

$$\omega_0 = \frac{R_\kappa + R_0}{\sqrt{2L_0}}.$$

Если принять во внимание (6), получим

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

Уравнение (8) удобно решить, например, численными методами с использованием графика  $B(IW)$ , построенного по таблице 1 и показанного на рис.4. При этом можно варьировать  $R_\kappa$ ,  $I$  или только  $I$ , считая  $R_\kappa = \text{const}$ .

Таблица 1

Магнитная характеристика цепи

| $\Phi$ , Вб          | $B$ , Тл | $H_{\text{ст}}$ , А/м | $H_\delta$ , А/м   | $H_{\text{ст}}I_{\text{ст}}$ , А | $H_\delta I_\delta$ , А | $(H_\delta \delta + H_{\text{ст}}I_{\text{ст}})$ , А | $I$ , А | $R_{\text{маг}}$ , 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   | $24,2 \cdot 10^6$       | 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   | $37,9610^6$             | 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   | $17,96 \cdot 10^6$      | 0,0358     |

Активное сопротивление катушки при известных  $\rho$  и  $d_{\text{np}}$  можно определить по формуле [12]:

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

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала провода;

$C_{\text{np}}$  – средняя длина витка;

$d_{\text{np}}$  – диаметр провода.

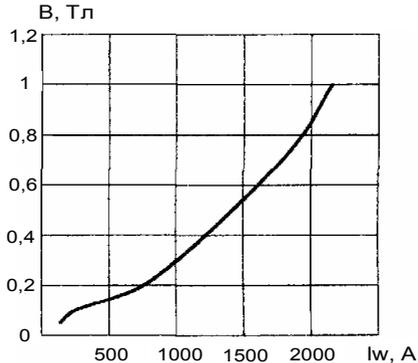


Рис. 4. Магнитная характеристика электромагнитного датчика.

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  $I=0,02A$  оптимальная частота  $\omega_0=104200$  рад/с, а напряжение  $U=74$  В, эти данные удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента, выполненного с использованием описанного датчика при диагностировании топливной аппаратуры дизелей мощностью 2000-4000 кВт.

Эксперимент показал, что точность определения параметров топливоподачи описанным датчиком возросла в 2,7-3,5 раза по сравнению со штатной системой диагностирования.

**Выводы:** использование электромагнитного датчика, установленного на топливопроводе высокого давления непосредственно у форсунки, позволяет регистрировать импульсы топливоподачи на деформации трубки, на которую не влияет вибрация двигателя. Выбор же оптимальной рабочей частоты позволяет повысить чувствительность датчика и точность диагностирования.

**Список литературы:** 1. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1989. – 416с. 2. Станиславский Л.В. Техническое диагностирование дизелей. – Киев: Вища школа. Главное изд-во, 1983. – 135 с. 3. Ле Ван Дием. Модели и алгоритмы технического диагностирования судовых дизельных установок в процессе эксплуатации: Автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук/Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций. – Санкт-Петербург, 2006. – 24с. 4. А.Б. Богаевский Совершенствование управления топливоподачей транспортных дизельных установок. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005.-№54. – с.83-87. 5. А.Б. Богаевский Повышение топливной экономичности и надежности мощных транспортных силовых установок при модернизации их систем управления топливоподачей. Вісник ХНТУСГ ім.П.Василенка. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2008. – вип.69, - с.347-351. 6. А.Б. Богаевский. Определение алгоритма управления изменением угла опережения впрыска топлива в мощных транспортных дизелях. Вісник СНУ ім. В.Даля. Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2008. – №7(125)ч.2. - с.184-188.

Поступила в редколлегию 14.05.2012