

ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ПОТЕРЬ НА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ

Вильданов Р.Г.¹, Давыдов А.С.¹, Хуснутдинова И.Г.¹

¹Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Салават, Россия (453250, г. Салават, ул. Губкина, 22б), e-mail: vildanov.rauf@yandex.ru

В данной работе приводится исследование датчиков потерь на перемагничивание для оценки уровня накопленных усталостных повреждений при циклических деформациях и выявления дефектов сплошности. Приведены результаты исследования датчиков потерь на перемагничивание. Получено выражение фазовой чувствительности датчика потерь на перемагничивание. В работе выявлена зависимость фазы сигнала датчика от приращения массы металла, обусловленное наличием дефекта, приведена кривая зависимости фазы сигнала датчика от магнитного сопротивления изделия при фазовом способе обработки напряжения, представлена зависимость амплитуды выходного сигнала от величины воздушного зазора на частоте 25 Гц. Показано, что в датчиках потерь на перемагничивание присутствует мешающий фактор в виде воздушного зазора между полюсами датчика и исследуемым металлом. Фазовая чувствительность датчика имеет высокие значения при малых значениях магнитного сопротивления воздушного зазора.

Ключевые слова: датчик потерь на перемагничивание, интроскоп, потери на перемагничивание.

STATISTICAL METHODS OF CONTROL IN INDUSTRY

Vil'danov R.G.¹, Davydov A.S.¹, Khusnutdinova I.G.¹.

¹Ufa State Oil Technical University branch in Salavat, Russia (453250, Salavat, street Gubkina, 22b), e-mail: vildanov.rauf@yandex.ru

In this paper presented a study of the remagnetization loss sensors to assess the level of fatigue damage accumulation under cyclic deformation and defect detection of continuity. In this paper presented the research results of the remagnetization loss sensors. In this paper obtained an expression of the phase sensitivity of the remagnetization loss sensors. In the work is revealed the dependence of the sensor signal phase from the weight gain of the metal due to the presence of the defect, the curve of the phase dependence from the magnetic resistance of the material during the handling of the phase voltage is represented, the dependence of the amplitude of the output signal from the air gap at a frequency of 25 Hz is represented. It has been shown that interfering factor is present in the form of an air gap between the poles of the sensor and the investigated metal in remagnetization loss sensors. The phase sensitivity of the sensor has a high value for small values of the magnetic resistance of the air gap.

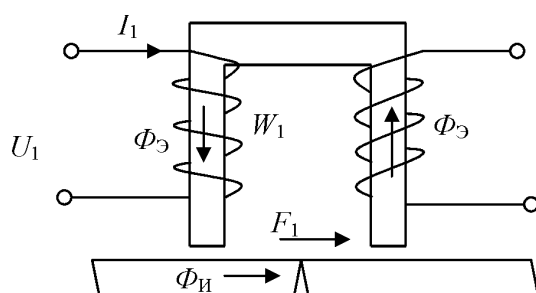
Key words: remagnetization loss sensor, introscope, remagnetization losses.

В настоящее время оценка уровня накопленных усталостных повреждений при циклических деформациях проводится разрушающим методом по результатам усталостных испытаний образцов, вырезанных из реальных конструкций или модельных образцов [1,2]. Однако вырезка образцов из реальных объектов приводит к нарушению целостности конструкции, а определение уровня накопленных усталостных повреждений на модельных образцах приводит к искажению результатов из-за неизбежных различий многочисленных факторов. Поэтому большое внимание уделяется определению уровня накопленных усталостных повреждений неразрушающими методами.

Разработан интроскоп и датчик для оценки поврежденного и напряженно – деформированного состояния конструкций, основанный на измерении потерь на перемагничивание в металле [3,4]. Принцип действия интроскопа основан на том факте, что если ферромагнит-

ный материал подвергается периодическому перемагничиванию, то в нем возникают потери энергии на гистерезис и вихревые токи. В данной работе приводится исследование датчиков потерь на перемагничивание для оценки уровня накопленных усталостных повреждений при циклических деформациях и выявления дефектов сплошности.

Датчик потерь перемагничивания создает в контролируемом изделии переменное магнитное поле и представляет собой приставной электромагнит с двумя полюсами и двумя обмотками: возбуждения и измерительной. К обмотке возбуждения подводится переменное напряжение от генератора опорных частот, а напряжение измерительной обмотки обрабатывается амплитудным или фазовым методом. На рис.1. представлено устройство датчика.



W_1 – число витков обмотки возбуждения; I_1 , U_1 – ток и напряжение обмотки возбуждения

Рис. 1. Датчик потерь перемагничивания

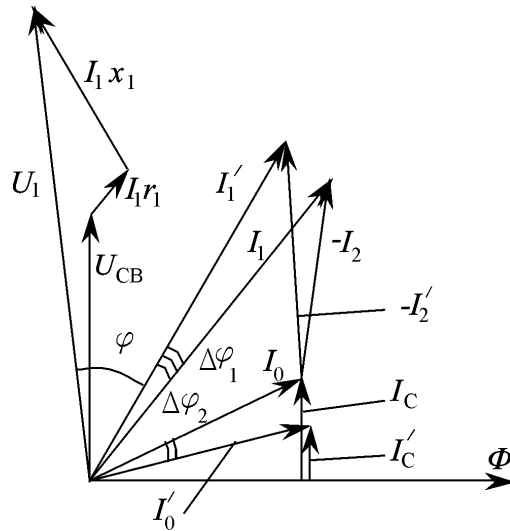
На рис. 2. представлена векторная диаграмма токов и напряжений датчика.

Фазовый сдвиг тока I_2 , а следовательно и выходного напряжения U_2 , обусловлен двумя факторами:

- уменьшением угла φ между векторами U_1 и I_1 на величину $\Delta\varphi_1$, вследствие чего вектор I_1 поворачивается против часовой стрелки, что приводит к повороту вектора I_2 против часовой стрелки;

- уменьшением потерь в изделии I_c , что приводит к повороту вектора I_0 по часовой стрелке на угол $\Delta\varphi_2$.

Полагая векторы I_1 , I_2 и I_0 соразмерными, изменения углов $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ можно отнести и к вектору I_2 .



$I_1 x_1$, $I_1 r_1$ – векторы падения напряжения на реактивном и активном сопротивлениях обмотки возбуждения; I_1 , I_2 – токи в обмотке возбуждения и измерительной обмотке; I_0 , I_C – начальный ток намагничивания и ток, обусловленный потерями в стали; I_1' , I_2' , I_C' и I_0' – векторы токов при уменьшении потерь перемagnичивания, вызванном напряженно-деформированным состоянием изделия; U_{CB} – вектор ЭДС в обмотке возбуждения; φ – угол сдвига между векторами ЭДС и тока в обмотке возбуждения; $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ – приращения угла φ , вызванные напряженно-деформированным состоянием изделия

Рис. 2. Векторная диаграмма токов и напряжений

Определим $\Delta\varphi_1$ как приращение угла от изменения индуктивности:

$$\Delta\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\Delta L}{L} = \operatorname{arctg} \frac{L - L'}{L}, \quad (1)$$

где

$$L = \frac{W_1^2}{R_M},$$

где $R_M = R_{\text{э}} + R_{\text{и}} + R_{\delta}$ – магнитное сопротивление магнитопровода, состоящее из сопротивлений электромагнита, изделия и зазора.

Подставив выражение индуктивности L в уравнение (1), получим:

$$\Delta\varphi_1 = \operatorname{arctg} \left(1 - \frac{R_{\text{э}} + R_{\text{и}} + R_{\delta}}{R_{\text{э}} + R_{\text{и}} + R_{\delta} + \Delta R_{\text{и}}} \right). \quad (2)$$

Как видно, фазовая чувствительность $\Delta\varphi_1$ тем больше, чем меньше магнитное сопротивление $R_M=R_\Sigma+R_{II}+R_\delta$.

Полагая треугольник I_0 , I_0' и ΔI_C прямоугольным:

$$\Delta\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{\Delta I_C}{I_0}. \quad (3)$$

Ток потерь в изделии:

$$I_C = \frac{P_C}{U_{CB}}, \quad (4)$$

где P_C – полные потери от вихревых токов и гистерезиса

$$P_C = m \cdot p_c, \quad (5)$$

где m – масса перемангничиваемой части изделия и сердечника;
 p_c – потери в 1 кг сердечника и изделия

$$p_c = p_{1,0} \cdot B^n, \text{ Вт/кг} \quad (6)$$

где

$$n = 5,6911g \cdot \frac{p_{1,5}}{p_{1,0}}, \quad (7)$$

где $p_{1,5}$ – потери в 1 кг стали при $B = 1,5$ Тл;
 $p_{1,0}$ – потери в 1 кг стали при $B = 1,0$ Тл;
 B – индукция в изделии, Тл.

$$\Delta I_C = \frac{\Delta m \cdot p_{1,0} \cdot B^n}{U_1}. \quad (8)$$

Полагая приращение ΔI_C малым, а треугольник прямоугольным:

$$\Delta\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{\Delta m \cdot p_{1,0} \cdot B^n}{U_1 \cdot I_1}. \quad (8a)$$

Суммарный фазовый сдвиг

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = \arctg\left(1 - \frac{R_{\text{э}} + R_{\text{и}} + R_{\delta}}{R_{\text{э}} + R_{\text{и}} + R_{\delta} + \Delta R_{\text{и}}}\right) + \arctg\frac{\Delta m \cdot p_{1,0} \cdot B^n}{U_1 \cdot I_0} \quad (9)$$

Из уравнения (9) видно, что $\Delta\varphi$ тем больше, чем меньше суммарное магнитное сопротивление цепи. Кроме того, суммарный фазовый сдвиг прямо пропорционально зависит от индукции в изделии и массы, следовательно, и объема дефекта.

Уравнения спинок петель гистерезиса изделия и электромагнита:

$$\Phi_{\text{и}} = \frac{U_{\text{си}} - U_{\text{и}}}{R_{\text{и}}}; \quad (10)$$

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{U_{\text{сэ}} - U_{\text{э}}}{R_{\text{э}}}, \quad (11)$$

Уравнения магнитостатики:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{\text{э}} = \Phi_{\text{э}} + F_1; \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{и}} + \Phi_{\text{и}} \cdot R_{\text{и}} = F_1 \cdot R_{\text{ф1}} = M + \Phi_{\text{э}} \cdot R_{\text{э}}; \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 \cdot R_{\text{ф1}} = U_{\text{и}} - \Phi_{\text{и}} \cdot R_{\delta}. \end{array} \right. \quad (14)$$

Подставив F_1 из второго уравнения в третье, а $\Phi_{\text{и}}$ – из первого уравнения и после преобразования, получим:

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{U_{\text{си}} - U_{\text{и}}}{R_{\text{и}}} + \frac{I_1 \cdot W_1 - \Phi_{\text{э}} \cdot R_{\text{э}} + U_{\text{сэ}}}{R_{\text{ф1}}}. \quad (15)$$

С учетом $U_{\text{и}} = F_1 \cdot R_{\text{ф1}} + \Phi_{\text{и}} \cdot R_{\delta}$ получим

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{U_{\text{си}} - F_1 \cdot R_{\text{ф1}} - \Phi_{\text{и}} \cdot R_{\delta}}{R_{\text{и}}} \cdot \frac{R_{\text{ф1}}}{R_{\text{ф1}} + R_{\text{э}}} + \frac{I_1 \cdot W_1 + U_{\text{сэ}}}{R_{\text{ф1}} + R_{\text{э}}}. \quad (16)$$

Полагая поток рассеяния F_1 малой величиной, можно допустить, что $\Phi_{\Sigma} = \Phi_{И}$. Тогда, после преобразования получим:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{\frac{U_{СИ}}{R_{И}} \cdot C + B}{1 + \frac{R_{\delta}}{R_{И}} \cdot C}, \quad (17)$$

где

$$C = \frac{R_{F1}}{R_{F1} + R_{\Sigma}}, \quad (18)$$

$$B = \frac{I_1 \cdot W_1 + U_{СЭ}}{R_{F1} + R_{\Sigma}}. \quad (19)$$

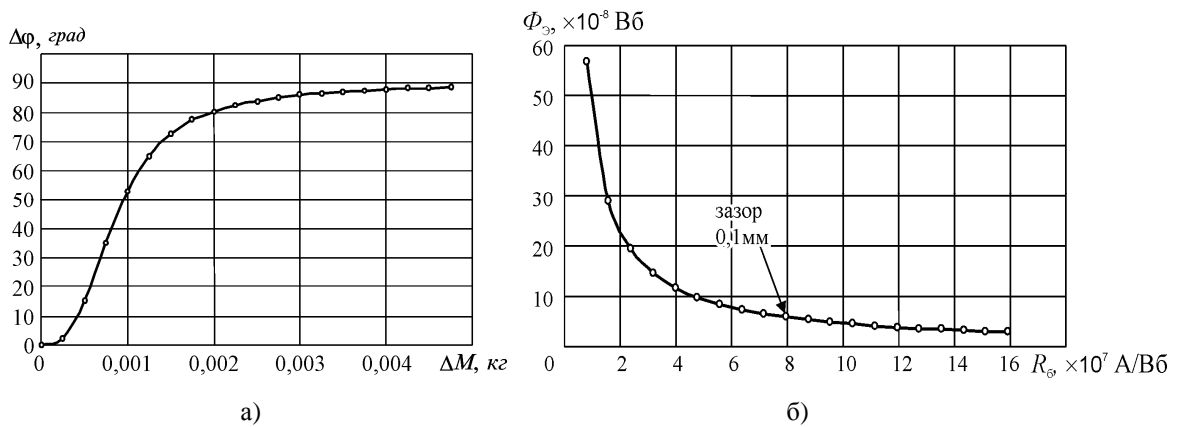
Чувствительность датчика при амплитудном способе обработки напряжения:

$$\frac{d\Phi_{\Sigma}}{dR_{И}} = \frac{U_{СИ} \cdot C}{R_{И}^2} \cdot \left(1 + \frac{R_{\delta}}{R_{И}} \cdot C \right) + \left(\frac{U_{СИ}}{R_{И}} \cdot C + B \right) + \frac{R_{\delta} \cdot C}{R_{И}^2}. \quad (20)$$

На рис. 3 (а) показана зависимость фазы сигнала датчика от приращение массы металла, обусловленное наличием дефекта, построенная по уравнению (9). Из уравнения (9) видно, что $\Delta\varphi$ тем больше, чем меньше суммарное магнитное сопротивление цепи. На рис. 3 (б) приведена теоретическая зависимость магнитного потока датчика от магнитного сопротивления воздушного зазора, построенная по уравнению (17). Из графика видно, что с увеличением воздушного зазора между датчиком и изделием магнитный поток датчика уменьшается. На графике выделена точка, соответствующая зазору 0,1 мм.

Из графика на рис. 4 (а) видно, что при малых значениях магнитного сопротивления изделия изменения фазового сдвига значительны, а при больших значениях магнитного сопротивления чувствительность снижается по экспоненте.

Фазовая чувствительность датчика имеет высокие значения при малых значениях магнитного сопротивления воздушного зазора (рис. 4 (б)). С ростом воздушного зазора фаза выходного сигнала стабилизируется, а чувствительность снижается. Из рис. 5 (а), видно, что увеличение величины воздушного зазора приводит к снижению амплитуды выходного сигнала датчика.



ΔM – приращение массы металла, обусловленное наличием дефекта; $\Delta\phi$ – изменение фазы выходного сигнала

Рис. 3. а) График зависимости фазы сигнала датчика от массы металла; б) Зависимость магнитного потока датчика от магнитного сопротивления воздушного зазора

Фазовая чувствительность датчика имеет высокие значения при малых значениях магнитного сопротивления воздушного зазора (рис. 4 (б)). С ростом воздушного зазора фаза выходного сигнала стабилизируется, а чувствительность снижается. Из рис. 5 (а), видно, что увеличение величины воздушного зазора приводит к снижению амплитуды выходного сигнала датчика.

На рис. 5 (б) показана экспериментальная зависимость фазы выходного сигнала датчика от величины воздушного зазора для частот 250 и 25 Гц при работе в фазовом режиме. Видно, что характер изменения фазы выходного сигнала при теоретическом и экспериментальном исследовании одинаков.

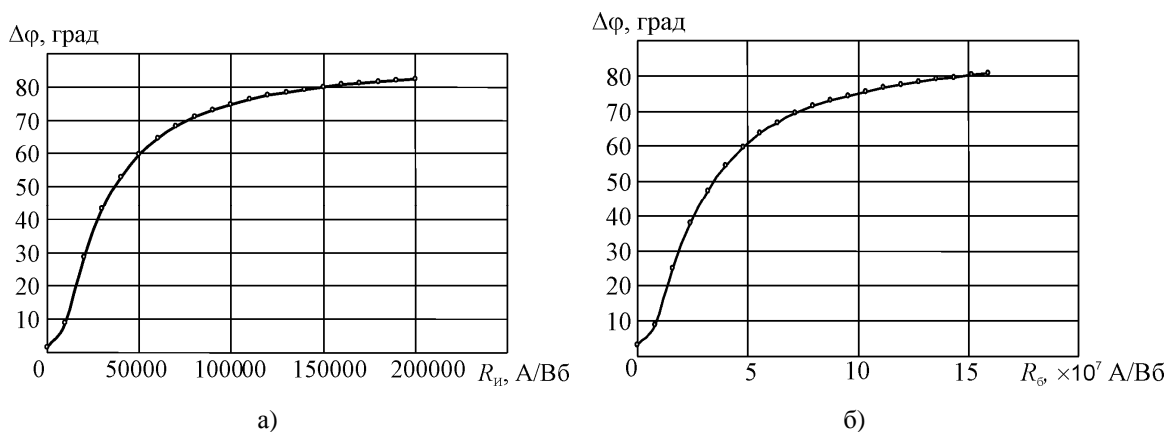


Рис. 4. а) Зависимость фазы сигнала датчика от магнитного сопротивления изделия; б) Зависимость фазы сигнала датчика от магнитного сопротивления воздушного зазора

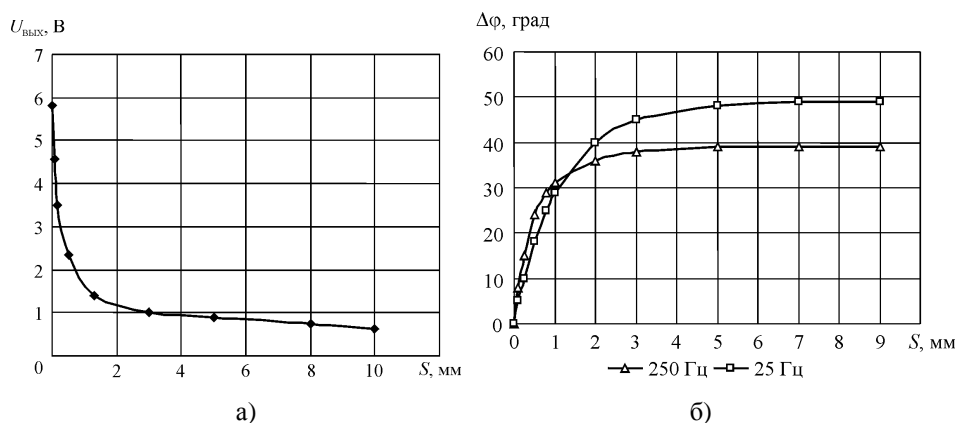


Рис. 5. а) Зависимость амплитуды выходного сигнала от величины воздушного зазора на частоте 25 Гц; б) Зависимость фазы выходного сигнала датчика от величины воздушного зазора

Заключение

Датчики потерь на перемагничивание могут работать в амплитудном и фазовом режимах. Необходимо разработать способы отстройки от изменения воздушного зазора между полюсами датчика и исследуемым металлом. Нужны конструкции датчика, обеспечивающие надежный контакт с металлом металлических конструкций.

Список литературы

- 1 Вильданов Р. Г. Магнитный интроскоп МД – 11ПМ // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 2. – С. 50 – 52.
- 2 Вильданов Р. Г. Датчик для оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкций // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2010. - №10. - С.45 – 48.
- 3 Ибрагимов И. Г., Вильданов Р. Г. Оценка напряженно-деформированного состояния резервуаров методом потерь перемагничивания // Безопасность труда в промышленности. - 2004. - № 7. - С. 36-38.
- 4 Калашников С .А. Влияние условий эксплуатации на усталостную прочность оболочковых конструкций из стали 09Г2С: дисс.... канд. техн. наук. – Уфа.: УГНТУ, 1998.-127 с.
- 5 Наумкин Е. А. Оценка долговечности аппаратов, подверженных малоцикловой усталости, по скорости ультразвука (на примере стали 09Г2С): дисс.... канд. техн. наук. – Уфа.: УГНТУ, 2000. - 116 с.

Рецензенты:

Баширов М.Г, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ЭАПП филиала ФГБОУ ВПО УГНТУ в г. Салавате, г. Салават;

Жирнов Б.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ХТП филиала ФГБОУ ВПО УГНТУ в г. Салавате, г. Салават.