

## ДИАГНОСТИКА ОБОЛОЧКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДВУХЧАСТОТНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

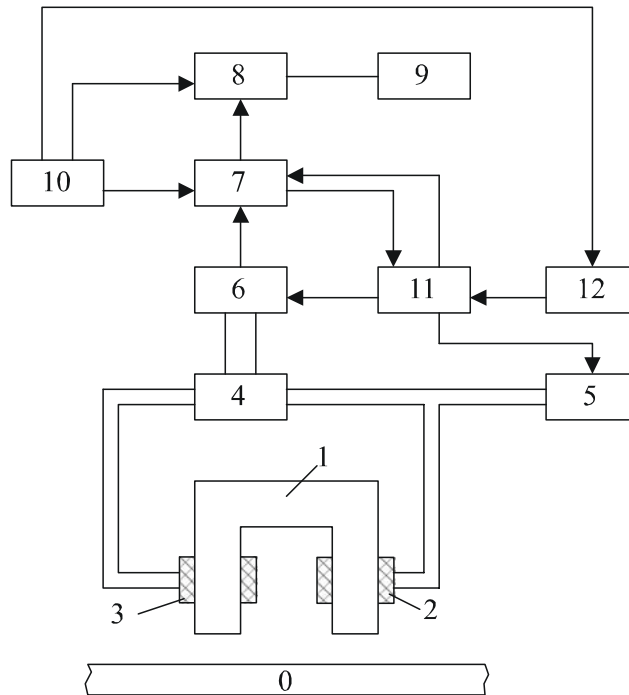
*Вильданов Р.Г.*

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

*Филиал в г. Салавате*

Оценка остаточного ресурса оборудования предполагает тщательный анализ его напряженно–деформированного состояния, определение степени износа (уменьшение толщины стенки в результате коррозии до предельных значений), выявление и оценку опасности дефектов. Контроль состояния участков трубопроводов и резервуаров в производственных условиях осуществляется во время плановых ремонтов методом измерения толщины стенки ультразвуковыми приборами. Недостатком ультразвуковых толщиномеров является необходимость специальной подготовки контролируемой поверхности. Для эффективного измерения толщины стенок резервуаров и трубопроводов предназначен магнитотелевизионный дефектоскоп [1]. Однако данный дефектоскоп позволяет визуализировать только поле дефекта и не дает изображения разреза металла. Автором предложен прибор для оценки поврежденного и напряженно–деформированного состояния конструкций, основанный на измерении потерь перемагничивания в металле [2]. Структурная схема прибора приведена на рисунке 1. Прибор содержит электромагнит 1, с намагничивающей 2 и измерительной 3 обмотками, фазовый детектор 4, управляемый генератор 5 гармонических колебаний, последовательно соединенные аналого-цифровой преобразователь 6, блок 7 памяти, цифро–аналоговый преобразователь 8, видеоконтрольный блок 9, синхрогенератор 10, вычислительно-логический блок 11 и запоминающее устройство 12.

Работа прибора основана на измерении потерь перемагничивания участка контролируемого изделия. Если ферромагнитный материал подвергается периодическому перемагничиванию, то в нем возникают потери энергии на гистерезис и вихревые токи.



**Рис. 1. Структурная схема прибора**

Электромагнит 1 устанавливают на изделие с зазором  $M_1$ . По сигналу от синхрогенератора 10 программа работы дефектоскопа вводится в вычислительно-логический блок 11, который устанавливает на управляемом генераторе 5 гармонических колебаний начальную высокую частоту  $N_1$ . Одновременно вычислительно-логический блок запускает аналого-цифровой преобразователь 6. Измерительная информация  $V_{M_1}^{N_1}$  с выхода фазового детектора 4 преобразуется в аналого – цифровом преобразователе 6 и записывается в блок памяти. Вычислительно-логический блок сравнивает поочередно данное значение измерительной информации  $V_{M_1}^{N_1}$  со значениями  $W_{M_1}^{N_1}$ , соответствующим различным фиксированным значениям зазора  $M_1$  между полюсами электромагнита и изделием, находит ближайшее значение  $W_{M_1}^{N_1}$  для частоты  $N_1$ . Затем вычислительный блок 11 изменяет дискретно частоту управляемого генератора 5 гармонических колебаний в сторону уменьшения частоты  $N_2$ . Измерительная информация  $V_{M_1}^{N_2}$ , соответствующая частоте  $N_2$ , также записывается в память. По значению  $W_{M_1}^{N_2}$  путем линейной интерполяции с учетом разницы  $W_{M_1}^{N_1} - V_{M_1}^{N_2}$  находится значение  $Z_{M_1}^{N_2}$ , соответствующее бездефектному участку изделия при зазоре  $M_1$ . После этого вычислительно-логический блок 11 сравнивает значения  $V_{M_1}^{N_2}$  и  $Z_{M_1}^{N_2}$  и решает вопрос о наличии

дефекта на данной глубине, соответствующей частоте  $N_2$ . Например, при наличии дефекта потери переманчиваются уменьшаются и значение  $V_{M1}^{N2}$  меньше  $Z_{M1}^{N2}$ , разность между ними через цифро-аналоговый преобразователь 8 подается на вход видео-контрольного устройства 9, причем яркость пятна на экране видеоконтрольного устройства зависит от величины разности  $Z_{M1}^{N2} - V_{M1}^{N2}$ . После этого вычислительно-логический блок устанавливает следующую более низкую частоту  $N_3$ , глубина проникновения магнитного поля в изделие увеличивается. При этом фазовый детектор вырабатывает сигнал  $V_{M1}^{N3}$ , вычислительно-логический блок 11 находит с учетом разности  $W_{M1}^{N1} - V_{M1}^{N1}$  по значению  $W_{M1}^{N3}$  путем линейной интерполяции значение  $Z_{M1}^{N3}$ , соответствующее бездефектному участку изделия при зазоре  $M_1$ . После этого вычислительно-логический блок 11 сравнивает сигналы  $Z_{M1}^{N3}$  и  $V_{M1}^{N3}$ . При наличии дефекта сигнал  $V_{M1}^{N3}$  меньше сигнала  $Z_{M1}^{N3}$  и на соответствующем месте экрана отображается соответствующее пятно.

Затем вычислительно-логический блок 11 устанавливает новое значение частоты  $N_4$ , причем  $N_4$  частота ниже частоты  $N_3$ . Так в приборе последовательно устанавливаются частоты от высоких значений до низких и при этом увеличивается глубина проникновения магнитного поля в изделие, осуществляется частотное сканирование изделия магнитным полем и по потерям на переманчивание устанавливается наличие дефекта на различной глубине.

Значение  $W_{M1}^{N1}$  заносится в блок 7 памяти на стадии подготовки к контролю следующим образом. Электромагнит 1 устанавливают на бездефектный участок и под электромагнит 1 подкладывают поочередно немагнитные прокладки различной толщины  $M_i$  (строго известной) и при частотах  $N_i$  записывают информацию в соответствующие ячейки памяти.

$$\begin{array}{l}
 W_{M1}^{N1}, W_{M2}^{N1}, W_{M3}^{N1}, \dots, W_{Mn}^{N1}, \\
 W_{M1}^{N2}, W_{M2}^{N2}, W_{M3}^{N2}, \dots, W_{Mn}^{N2}, \\
 \text{-----} \\
 W_{M1}^{Nn}, W_{M2}^{Nn}, W_{M3}^{Nn}, \dots, W_{Mn}^{Nn},
 \end{array}$$

Наличие в памяти предварительно записанных при высокой частоте  $N_1$  значений  $W_{M_i}^{N_1}$  позволяет произвести отстройку изменения зазора между электромагнитом 1 и изделием. Отстройка происходит следующим образом. Допустим, на частоте  $N_1$  в блок памяти записалось значение  $V_{M_x}^{N_1}$ , причем  $W_{M_1}^{N_1} > V_{M_x}^{N_1} > W_{M_2}^{N_1}$ . Вычислительно-логический блок 11 находит меньшее значение  $W_{M_2}^{N_1}$  и ближайшее большее значение  $W_{M_1}^{N_1}$  и вычисляет разности  $W_{M_1}^{N_1} - W_{M_2}^{N_1}$ ,  $W_{M_1}^{N_2} - W_{M_2}^{N_2}$  и, например,  $V_{M_x}^{N_1} - W_{M_2}^{N_1}$ . Путем линейной интерполяции по соотношению

$$\frac{(V_{M_x}^{N_1} - W_{M_2}^{N_1}) \cdot (W_{M_1}^{N_2} - W_{M_2}^{N_2})}{(W_{M_1}^{N_1} - W_{M_2}^{N_1})}$$

находится поправка на зазор для частоты  $N_2$  и путем алгебраического суммирования  $W_{M_2}^{N_2}$  и поправки находится значение  $Z_{M_x}^{N_2}$ , соответствующее бездефектному участку изделия при частоте  $N_2$  и зазоре  $M_x$ . После этого согласно алгоритма контроля прибор переходит на частоту  $N_2$  и заносит в блок 7 памяти значение  $V_{M_x}^{N_2}$ . Затем вычисляется разность  $Z_{M_x}^{N_2} < V_{M_x}^{N_2}$ . При наличии дефекта величина разности будет больше нуля, так как при наличии дефекта величина потерь переманчивания участка изделия будет меньше. Поправка для частоты  $N_1$  не находится, так как предполагается, что поверхностные дефекты отсутствуют.

Сигнал разности  $Z_{M_x}^{N_2} - V_{M_x}^{N_2}$  по сигналу от синхрогенератора 10 преобразуется в цифроаналоговый преобразователь 8 и подается в видеоконтрольный блок 9, на экране которого отображаются сигналы в виде светового пятна, соответствующие различным частотам магнитного поля, а значит, и различным глубинам проникновения магнитного поля. При движении электромагнита 1 и синхронной развертки луча видеоконтрольного блока 9 на экране возникает изображение поперечного сечения контролируемого участка.

Фазовый детектор 4 формирует сигнал, пропорциональный потерям на переманчивание контролируемого участка изделия.

Управляемый генератор 5 гармонических колебаний формирует по сигналу от вычислительно-логического блока 11 пакеты гармонических колебаний различной частоты. Количество дискретных значений частоты  $N_1$  зависит от требований к точности и чувствительности прибора к дефектам. Верхняя частота

может лежать в пределах нескольких килогерц, а нижняя частота – несколько герц или десятки герц в зависимости от толщины контролируемого изделия.

При контроле более глубоких слоев металла в алгоритме необходимо учитывать влияние дефектов, обнаруженных в подповерхностных слоях металла, для чего из разности, например  $Z_{Мх}^{N5} - V_{Мх}^{N5}$  для частоты  $N_5$  вычитается величина разности  $Z_{Мх}^{N4} - V_{Мх}^{N4}$ , вычисленной при частоте  $N_4$ . При этом учитывается уменьшение потерь перемангничивания из-за дефектов обнаруженных на частотах  $N_2$  от  $N_4$ .

Таким образом, прибор позволяет путем изменения частоты магнитного поля от высоких значений до низких постепенно перемангничивать участок изделия слой за слоем, тем самым осуществлять частотное сканирование и по потерям перемангничивания получить изображение поперечного сечения контролируемого участка.

На рисунке 2 приведена эквивалентная расчетная схема датчика потерь перемангничивания. Напряжение измерительной обмотки может обрабатываться амплитудным и фазовым методами [3].

Магнитный поток в сердечнике датчика при амплитудном методе

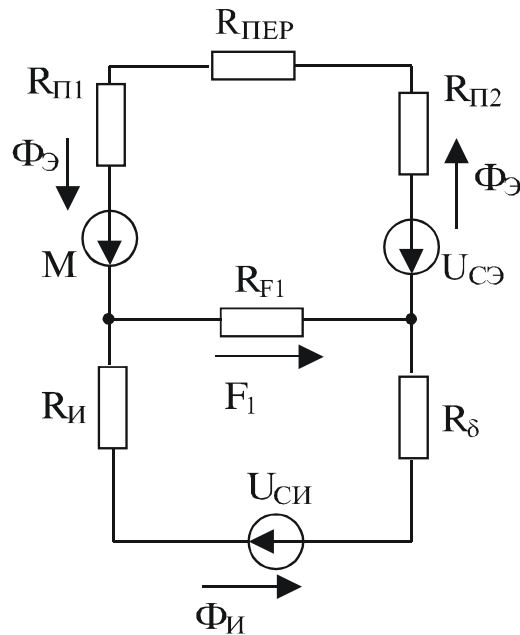
$$\Phi_{\text{Э}} = \left( \frac{U_{\text{СИ}} - \Phi_{\text{Э}} \cdot R_{\delta}}{R_{\text{И}}} \right) \cdot C + B, \quad (1)$$

$$\text{где } C = \frac{R_{\text{FI}}}{R_{\text{FI}} + R_{\text{Э}}};$$

$$B = \frac{I_1 \cdot \omega_1 + U_{\text{СЭ}}}{R_{\text{FI}} + R_{\text{Э}}}.$$

Продифференцировав уравнение (1), получим выражение для чувствительности датчика

$$\frac{d\Phi_{\text{Э}}}{dR_{\text{И}}} = \frac{(R_{\text{И}} + R_{\delta} \cdot C) \cdot B - U_{\text{СИ}} \cdot C + B \cdot R_{\text{И}}}{(R_{\text{И}} + R_{\delta} \cdot C)^2}. \quad (2)$$

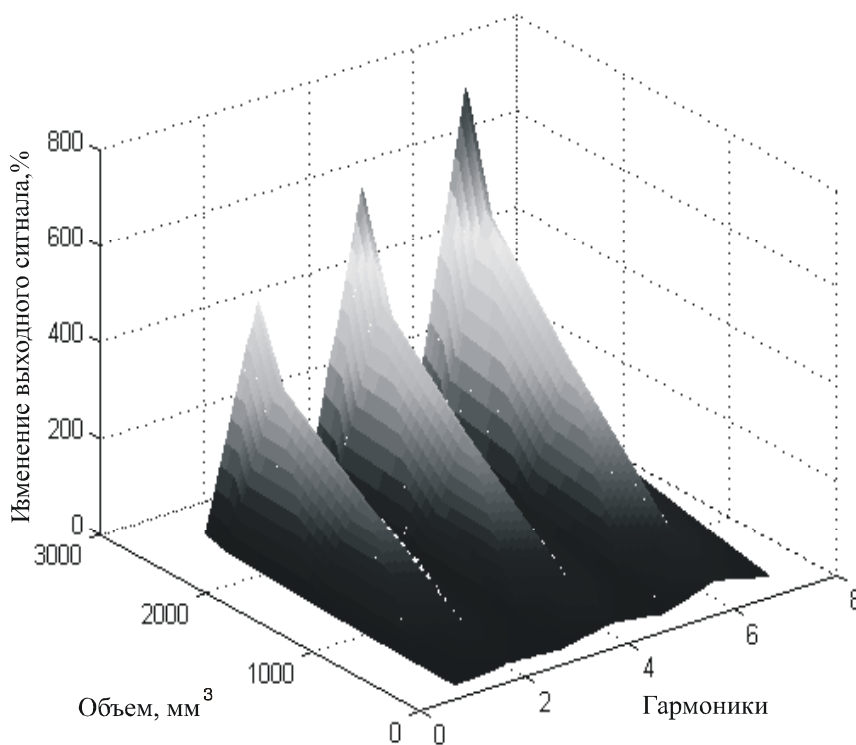


**Рис. 2. Эквивалентная расчетная схема:  $U_{СЭ}$ – падение**

магнитного потенциала в электромагните;  $U_{СИ}$ – падение магнитного потенциала в изделии;  $R_{П1}$ ,  $R_{П2}$  – магнитные сопротивления полюсов;  $R_{ПЕР}$ – магнитное сопротивление перемычки;  $R_{И}$ ,  $R_{\delta}$  – магнитные сопротивления изделия и двух зазоров между изделием и полюсами;  $R_{Ф1}$  – магнитное сопротивление потоку рассеяния;  $M$  – магнитодвижущая сила обмотки возбуждения;  $\Phi_{Э}$ – магнитный поток возбуждения.

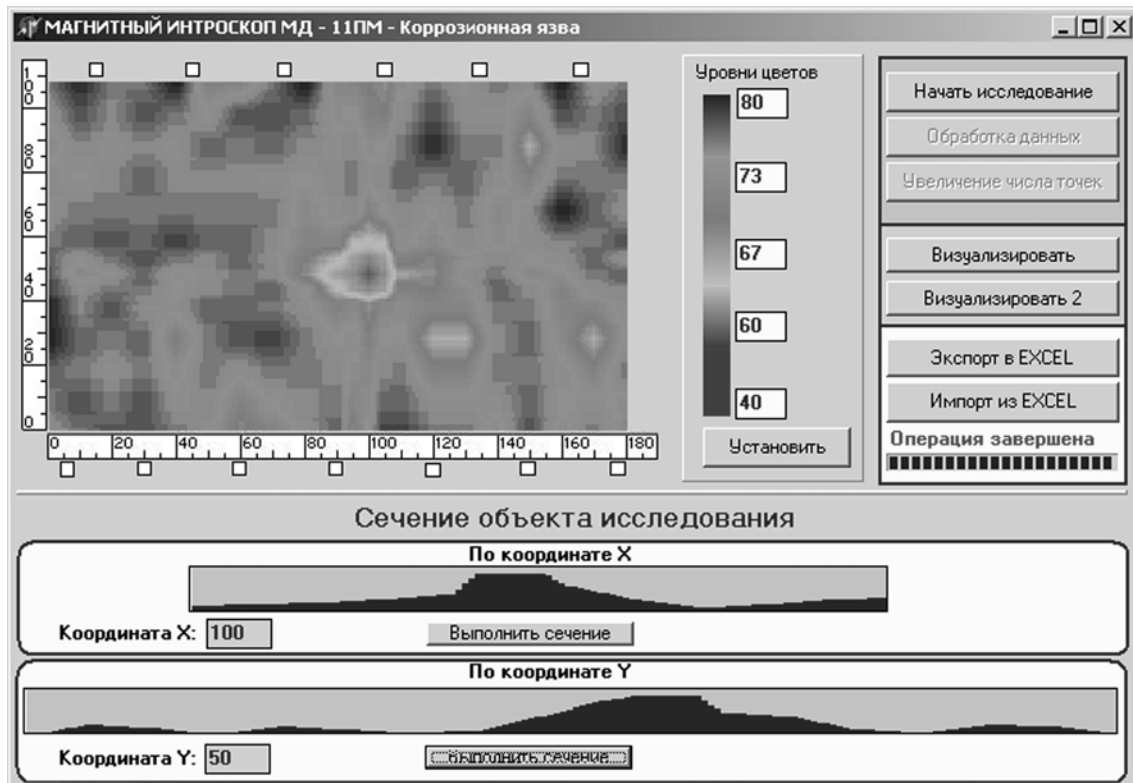
Анализ уравнения (2) показывает, что чувствительность датчика практически постоянна в широком диапазоне изменения магнитного сопротивления изделия  $R_{И}$  и это подтверждается экспериментальными исследованиями. На рисунке 3 приведены результаты экспериментального исследования зависимости амплитуды выходного сигнала датчика от объема дефекта. В электротехнике потери измеряются при постоянной индукции  $B = \text{const}$ . Однако, измерения потерь перемагничивания можно проводить и в других режимах при условии сохранения монотонной зависимости показаний [4]. Опыты проводились на высших гармониках с использованием программного комплекса SpectraLab фирмы Sound Technology Inc., который формирует ток возбуждения и выполняет обработку измерительного сигнала. При экспериментальных исследованиях потери измерялись как мощность, которая расходуется в

намагничивающей цепи. Из графиков видна однозначная монотонная зависимость амплитуды выходного сигнала датчика от объема дефекта, даже если не поддерживать режим постоянной индукции. Изменение наклона кривых в зоне больших объемов объясняется, по-видимому, изменением соотношения между потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи. Из рисунка 3 видно, что чувствительность на высших гармониках в десятки раз выше, чем на основной гармонике. Так, на основной гармонике 25 Гц при изменении объема дефекта от 2500 мм<sup>3</sup> до 100 мм<sup>3</sup> выходной сигнал изменился на 17%, в то время как на шестой гармонике изменение выходного сигнала составило 680%.



**Рис. 3. График зависимости выходного сигнала от объема дефекта**

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана модификация прибора МД– 11ПМ для частотного сканирования объектов, реализующая двухчастотный режим сканирования.



**Рис. 4. Изображение коррозионной язвы и поперечного сечения стенки аппарата**

На рисунке 4 приведено изображение коррозионной язвы (координаты по вертикали–50, по горизонтали–100) на фоне общей коррозии внутренней поверхности технологического аппарата. В нижней части рисунка сформировано изображение поперечного сечения стенки аппарата, позволяющее судить о глубине дефекта, глубине залегания дефекта, остаточную толщину стенки.

#### **Технические характеристики модификации прибора МД– 11ПМ**

Порог чувствительности к дефектам, % от толщины материала	20
Скорость контроля, м/мин.	5
Ширина контролируемой зоны при перемещении датчика по поверхности изделия, мм	10
Питание от сети переменного тока	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, Вт	50

Габаритные размеры прибора, мм	200x200x100
Габаритные размеры датчика, мм	40x40x25

Результаты исследований позволяют утверждать, что прибор с успехом можно использовать для диагностики состояния труб и резервуаров на наличие дефектов, общей коррозии и местных утончений стенки.

### Список литературы

1. Вильданов Р. Г., Шкарлет Ю. М., Абакумов А. А., Баширов М. Г. Магнитотелевизионный дефектоскоп для контроля качества крупногабаритных ферромагнитных изделий // Дефектоскопия – 1988, № 9, с. 84 –86.
2. Вильданов Р. Г. Магнитотелевизионный дефектоскоп. Патент № 1779991 (РФ). МКИ G01 N 27/ 82. // Открытия. Изобретения. 1992, № 45.
3. Вильданов Р. Г. Теоретическое исследование чувствительности магнитного дефектоскопа. //Сборник трудов Стерлитамакского филиала Академии наук Республики Башкортостан. Серия “Физико– математические и технические науки”.–Уфа, 2001, выпуск 2, – с.163–165.
4. Михеев М. Н., Пономарев В. С., Морозова В. М., Ремез Н. В., Деордиев Г. И. Об измерениях потерь перемагничивания при контроле качества термообработки //Дефектоскопия – 1987, №12, с. 72–74.