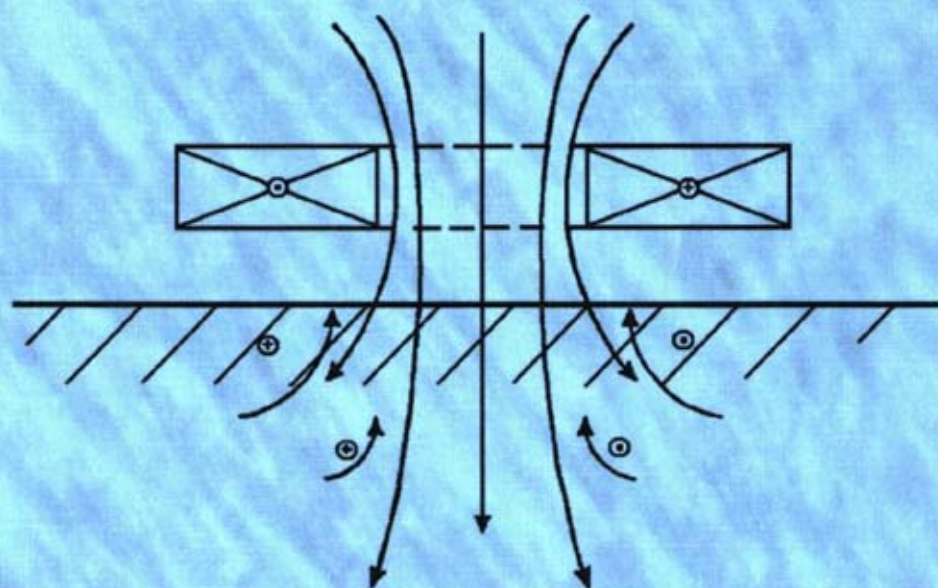


Троицкий В.А.

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ



2011

Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е.О.Патона
Украинское общество неразрушающего контроля
и технической диагностики

Троицкий В.А.

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ

- Часть 1 Теоретические основы вихретокового метода
- Часть 2 Подготовка операторов I и II уровней квалификации
- Часть 3 Подготовка специалистов III уровня квалификации

УДК 620.179:621.3.014.4] (075)
ББК 30.3-087я7
Т70

Троицкий В. А.

Т70 Вихретоковый контроль. Учебн. пособие / В. А. Троицкий. -К.:—
«Феникс». - 2011. - с. 148. илл.

ISBN 978-966-651-883-8

Рассмотрены теоретические и практические вопросы вихретокового контроля качества материалов и изделий. Для задач диагностики элементов энергетического, аэрокосмического и др. комплексов рассмотрены методики обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов. Используются материалы для подготовки дефектоскопистов согласно уставам российского (РОНКТД), украинского (УОНКТД) и американского (ASNT) обществ нераз-рушающего контроля по трем уровням квалификации в соответствии с требованиями ISO 9712, EN 473, SNT-TC-1A, ДСТУ EN 473.

Пособие может быть использовано учебными и аттестационными центрами разных ведомств.

УДК 620.179:621.3.014.4] (075)
ББК 30.3-087я7

ISBN978-966-651-883-8

© ИЭС им.Е.О.Патона НАНУУкраины; 2011

ВВЕДЕНИЕ

Вихретоковый метод неразрушающего контроля (НК) основан на взаимодействии с объектом контроля (ОК) переменного электромагнитного поля, диапазон которого изменяется от единиц герц до десятков мегагерц.

Особенностью вихретокового контроля является то, что его можно проводить при отсутствии контакта между вихретоковым преобразователем (ВТП) и ОК. Получение первичной информации в виде электрических сигналов, отсутствие контакта и высокая производительность определяют широкие возможности метода для автоматизации. Несомненное достоинство ВТП – простота его конструкции.

Объектами вихретокового контроля могут быть изделия, изготовленные из металлов, сплавов, графита, полупроводников и других электропроводящих материалов.

Выпускаются различные типы ручных и автоматизированных вихретоковых дефектоскопов, толщиномеров покрытий и тонких металлических слоев, измерителей удельной электрической проводимости металлов, структуроскопов различного назначения.

Успехи в развитии информатики, микроэлектроники и вычислительной техники оказали глубокое влияние на развитие систем неразрушающего контроля промышленной продукции, привели к увеличению роли этих систем в повышении ее качества.

Для правильного выбора вида, метода и средств НК необходимо знание возможного диапазона изменения физических свойств и параметров материала ОК, его структуры, технологии производства, условий эксплуатации ОК, а также физических принципов методов НК, их технических возможностей и характеристик конкретной аппаратуры. Поэтому в данном пособии, предназначенном в основном для операторов, занимающихся ВТК конкретных объектов, приведены некоторые свойства электропроводящих материалов.

Пособие состоит из теоретической и двух практических частей, предназначенных для специалистов I, II и III уровней квалификации по ВТК, вопросов и ответов для самоподготовки. Объем книги ограничен, поэтому ответы на некоторые экзаменационные вопросы следует искать в фундаментальных монографиях, изданных под редакцией профессоров Клюева В.В., Шарпа Р., Фёрстера Ф., Сухорукова В.В., Дорофеева А.Л. и др.

Экзаменационные вопросы практически по всем стандартам ASNT, ДСТУ, EN периодически частично обновляются, однако смысл их остается прежним. Поэтому учебные вопросы и ответы, взятые из публикаций прошлых лет, для учебного процесса всегда актуальны. Читатель должен обладать элементарными знаниями электротехники, без которых отдельные разделы освоить будет трудно.

Пособие написано по материалам, используемым в Центре сертификации Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики, который аккредитован Российским обществом неразрушающего контроля и технической диагностики, где главным учебником является книга [1] под редакцией проф. Клюева В.В. Эта монография использована при написании теоретической (первой) части пособия.

Автор выражает благодарность сотрудникам отдела «Неразрушающих методов контроля качества сварных соединений» Института электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины Майдан 3.А., Загребельному В.И., Циприанович И.В. за оказанную помощь в подготовке данного издания.

Часть 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА

1.1. Переменный синусоидальный ток и его представление в комплексном виде

При вихретоковом контроле [1, 3, 20, 21] электромагнитное поле создается переменным током в возбуждающей катушке вихретокового преобразователя. Чаще всего используется синусоидальный переменный ток. Рассмотрим его основные параметры [1, 3].

Значения переменного тока в любой момент времени называют *мгновенными значениями* и обозначают буквой i . На рис. 1.1 представлен график мгновенных значений тока i , который можно рассматривать как функцию времени t или фазового угла $\gamma = \omega t$. Величина синусоидального тока является периодической функцией времени, т.е. через промежуток времени T , называемый *периодом*, цикл колебаний повторяется: $i(t) = i(t + T)$. Периоду времени T соответствует фазовый угол, равный 2π . Величину, обратную периоду, называют *частотой* $f = \frac{1}{T}$.

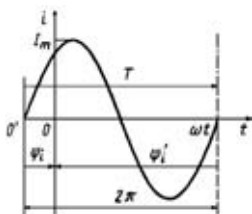


Рис. 1.1. График мгновенных значений тока

Мгновенное значение синусоидального тока определяется функцией $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Амплитуда тока I_m равна его максимальному значению. Аргумент синуса $(\omega t + \psi_i)$ определяет фазовый угол и называется *фазой*, а величина ψ_i , равная фазе в момент начала отсчета времени ($t = 0$), называется *начальной фазой*, которая отсчитывается от начала синусоиды до начала координат. Единицей измерения величины фазы является радиан.

Угловая частота ω – это скорость колебаний, она определяется числом радиан за секунду $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$. Единицей угловой частоты является *радиан в секунду*. Промышленной частоте $f = 50$ Гц соответствует угловая частота $\omega = 314$ рад/с.

Все сказанное справедливо не только для синусоидального тока, но и для любой синусоидальной величины:

$$\text{для напряжения } u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

$$\text{для магнитного потока } \phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_\phi) \text{ и т. д.}$$

При совместном рассмотрении нескольких синусоидальных электрических и магнитных величин одной частоты обычно интересуются фазовыми соотношениями, например, между напряжением и током. Разность начальных фаз двух величин называется *сдвигом фаз*. Так, $\psi_u - \psi_i = \varphi$ – сдвиг фаз между напряжением и током. Синусоидальную величину с большей начальной фазой принято называть *опережающей*, а с меньшей – *отстающей*. Если синусоидальные величины имеют одинаковые начальные фазы, то говорят, что они совпадают по фазе; если разность начальных фаз равна $\pm \pi$, то синусоидальные величины противоположны по фазе.

В практике применения переменных токов широко пользуются понятием действующего значения тока, напряжения и т.п., под которым понимается среднеквадратичное значение переменной электрической величины за период. Так, выражение для действующего

$$\text{значения переменного тока имеет вид } I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

Можно показать, что для синусоидального тока и напряжения действующее и амплитудное значения связаны соотношением

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Приборы для измерения переменных электрических величин чаще всего градуируются в действующих значениях. Для упрощения расчетов электрических цепей переменного синусоидального тока широко используется математический аппарат комплексных чисел. Как известно, расчет электрических цепей осуществляется на основе законов Кирхгофа. Рассмотрим в качестве примера при-

менение первого закона Кирхгофа. Пусть, для какого либо узла (рис. 1.2) известны величины токов $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$, $i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2)$ и нужно определить значение тока i_0 :

$$i_0 = i_1 + i_2 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2).$$

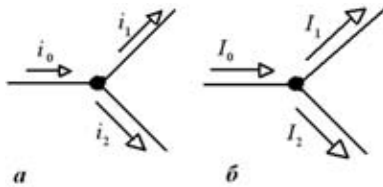


Рис. 1.2. Узел электрической цепи: i , I – мгновенное и амплитудное значения токов

Очевидно, что искомый ток будет также синусоидальной функцией времени с угловой частотой, равной известной частоте ω , т.е.

$$i_0 = I_{0m} \sin(\omega t + \psi_0).$$

В этом выражении необходимо найти амплитуду I_{0m} и начальную фазу ψ_0 . Для этого следует применить правила тригонометрии, но гораздо проще это сделать с помощью комплексных чисел. Из известных формул $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$ и $e^{-j\alpha} = \cos \alpha - j \sin \alpha$ вытекает, что $\sin \alpha = \frac{e^{j\alpha} - e^{-j\alpha}}{2j}$, где e – основание натурального логарифма; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Выразив синусоидальные токи i_1 , i_2 и i_0 через комплексные показательные функции и сократив на множитель $2j$, получим $I_{0m} e^{j(\omega t + \psi_0)} = I_{1m} e^{j(\omega t + \psi_1)} + I_{2m} e^{j(\omega t + \psi_2)}$.

Разделив все члены на общий множитель $e^{j\omega t}$, найдем $I_{0m} e^{j\psi_0} = I_{1m} e^{j\psi_1} + I_{2m} e^{j\psi_2}$. Таким образом, синусоидальные токи символически представлены комплексными числами, операции с которыми значительно проще операций с тригонометрическими (синусоидальными) функциями.

Комплексные амплитуды обозначают той же буквой, что и амплитуды синусоидальной величины, но над этими буквами ставят точки:

$$\dot{I}_{0m} = I_{0m} e^{j\psi_0}, \quad \dot{I}_{1m} = I_{1m} e^{j\psi_1}, \quad \dot{I}_{2m} = I_{2m} e^{j\psi_2}.$$

Учитывая это, уравнение, составленное для узла по первому закону Кирхгофа, можно записать в упрощенном виде $\dot{I}_{0m} = \dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m}$. Аналогично вводятся понятия комплексных амплитуд для напряжения \dot{U}_m , магнитного потока $\dot{\Phi}_m$ и других электрических и магнитных величин.

Комплексные действующие значения пропорциональны комплексным амплитудам в виде:

$$\dot{I} = I e^{j\psi_1}; \quad \dot{U} = U e^{j\psi_n}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Комплексному числу присваивают размерность той электрической величины, которой она соответствует. Следует иметь в виду, что аппарат комплексных изображений применим для анализа электрических и магнитных цепей, в которых электрические и магнитные величины изменяются во времени с одинаковой частотой.

В приведенных формулах комплексные величины записаны в показательной форме, удобной при умножении и делении. Сложение и вычитание комплексных чисел следует проводить с помощью их алгебраической формы, которую можно получить, применяя формулу Эйлера:

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_1} = I_m (\cos \psi_1 + j \sin \psi_1).$$

1.2. Векторные диаграммы синусоидальных токов и напряжений

Комплексные изображения синусоидальных электрических величин можно представить графически. Пример графического изображения комплексов тока и напряжения показан на рис. 1.3. На комплексной плоскости по оси абсцисс откладываются действительные значения $\operatorname{Re} \dot{U}_m$ и $\operatorname{Re} \dot{I}_m$, а по оси ординат – мнимые значения $\operatorname{Im} \dot{U}_m$ и $\operatorname{Im} \dot{I}_m$ комплексов напряжения и тока. Длины векторов пропорциональны в выбранном масштабе модулю комплексной амплитуды. Угловое положение вектора относительно положительной действительной полуоси определяется аргументом ком-

плексной амплитуды. Геометрические места концов этих векторов принято называть *годографами*.

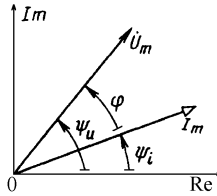


Рис. 1.3. Пример построения векторной диаграммы

Очень часто при анализе сигналов ВТП приходится находить сумму или разность двух синусоидальных напряжений одной частоты, например, в случае применения дифференциальных ВТП, когда их измерительные обмотки включаются последовательно и встречно. На рис. 1.4 показаны векторные диаграммы при сложении (а) и вычитании (б) двух напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 .

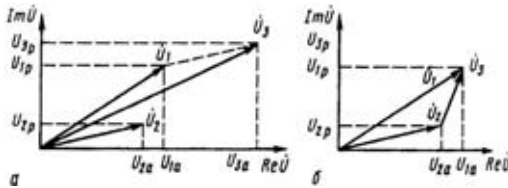


Рис. 1.4. Пример векторных диаграмм

Из рис. 1.4,а видно, что результирующий вектор \dot{U}_3 отстает от вектора \dot{U}_1 и опережает вектор \dot{U}_2 . Численные значения модуля и аргумента комплексного действующего значения результирующего напряжения \dot{U}_3 можно получить следующим образом. Пусть комплексы суммируемых напряжений равны: $\dot{U}_1 = U_1 e^{j\psi_{u1}} = U_{1a} + jU_{1p}$ и $\dot{U}_2 = U_2 e^{j\psi_{u2}} = U_{2a} + jU_{2p}$, причем модули комплексов $U_1 = \sqrt{U_{1a}^2 + U_{1p}^2}$ и $U_2 = \sqrt{U_{2a}^2 + U_{2p}^2}$, а их аргументы:

$$\psi_{u1} = \arctg \frac{U_{1p}}{U_{1a}} = \arcsin \frac{U_{1p}}{U_1} \quad \text{и} \quad \psi_{u2} = \arctg \frac{U_{2p}}{U_{2a}} = \arcsin \frac{U_{2p}}{U_2}.$$

Модуль и аргумент комплексного действующего значения результирующего напряжения $\dot{U}_3 = U_3 e^{j\psi_{u3}} = U_{3a} + jU_{3p}$ можно найти по формулам:

$$U_3 = \sqrt{U_{3a}^2 + U_{3p}^2} = \sqrt{(U_{1a} + U_{2a})^2 + (U_{1p} + U_{2p})^2}$$

$$\psi_{u3} = \text{arctg} \frac{U_{1p} + U_{2p}}{U_{1a} + U_{2a}} = \arcsin \frac{U_{1p} + U_{2p}}{U_3}.$$

Аналогично можно найти модуль и аргумент результирующего комплекса \dot{U}_3 при вычитании напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 , но только в этом случае $U_{3a} = U_{1a} - U_{2a}$ и $U_{3p} = U_{1p} - U_{2p}$, т.е. активная и реактивная составляющие результирующего комплекса равны не сумме, а разности соответственно активных и реактивных составляющих комплексов \dot{U}_1 и \dot{U}_2 .

1.3. Закон электромагнитной индукции. Собственная и взаимная индуктивность

Вихретоковый преобразователь представляет собой катушку с переменным током i (рис. 1.5), создающим переменное магнитное поле. Переменное магнитное поле в соответствии с законом электромагнитной индукции индуцирует в катушке электродвижущую силу (ЭДС) самоиндукции e_L , значение которой определяется скоростью изменении потокосцепления Ψ витков катушки с магнитным полем: $e_L = -\frac{d\Psi}{dt}$. Потокосцепление определяется по форму-

ле $\Psi = \sum_1^w \Phi_k$, где w – число витков катушки; Φ_k – магнитный

поток через поверхность, ограниченную контуром k -го витка.

При отсутствии в пространстве, окружающей катушку, ферромагнитных материалов между потокосцеплением и током катушки существует линейная зависимость $\Psi = Li$, где L – коэффициент самоиндукции, называемый *собственной индуктивностью* катушки или просто *индуктивностью*. Поэтому ЭДС можно записать в

виде $e_L = -L \frac{di}{dt}$. Единицей магнитной индукции является тесла (Тл), магнитного потока и потокосцепления – вебер (Вб), а индуктивности – генри (Гн).

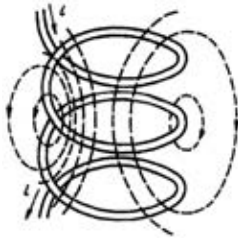


Рис. 1.5. Магнитное поле индуктивной катушки

Во многих случаях электрическая энергия, выделяемая в индуктивной катушке в результате нагрева провода обмотки, невелика, и ею можно пренебречь. В этом случае единственным параметром, характеризующим индуктивную катушку, является ее собственная индуктивность L , а энергетические процессы в ней определяются только явлениями, происходящими в ее магнитном поле. Приложенное к индуктивной катушке переменное напряжение уравновешивает ЭДС самоиндукции, т.е. $u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$.

Пусть в индуктивном элементе протекает синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Изменяющееся потокосцепление наводит в индуктивном элементе ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} = -L \omega I_m \cos(\omega t + \psi_i) = E_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i - \pi/2),$$

где $E_{Lm} = L \omega I_m$.

При синусоидальном изменении тока ЭДС самоиндукции также синусоидальна, причем ЭДС отстает по фазе от тока на четверть периода. Графики мгновенных значений i , Ψ , e_L и u для случая $\psi_i = 0$ показаны на рис. 1.6,а. Поскольку $u_L = -e_L$, то напряжение опережает ток на четверть периода, т.е. угол сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2$. Амплитудные значения тока и напряжения связаны соотношением $U_m = L \omega I_m$. Величину

$L\omega$ обозначают X_L и называют *индуктивным сопротивлением*. Тогда $U_m = X_L I_m$.

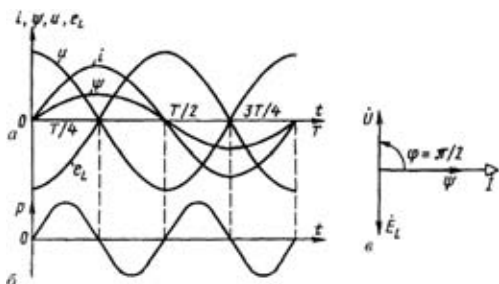


Рис. 1.6. Графики мгновенных значений напряжения, тока, ЭДС (а), мощности (б), векторная диаграмма (в) цепи с индуктивной катушкой

В комплексной форме запись закона Ома выглядит следующим образом: если $\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u} = X_L I_m e^{j(\psi_i + \pi/2)}$ и $\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$, то комплексное сопротивление $Z = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = X_L e^{j\pi/2} = jX_L$.

Следовательно, $\dot{U}_m = jX_L \dot{I}_m$ и $\dot{U} = jX_L \dot{I}$, т.е. при отсутствии активного сопротивления комплексное сопротивление катушки является положительным мнимым числом, модуль которого равен X_L .

Векторная диаграмма для катушки без активного сопротивления с током $i = I_m \sin \omega t$ построена на рис. 1.6, в. На диаграмме видно, что вектор напряжения на индуктивном элементе опережает ток на $\pi/2$, векторы напряжения и ЭДС находятся в противофазе, а вектор потокосцепления совпадает по фазе с током.

Мгновенная мощность индуктивного элемента будет:

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t + \pi/2) = \\ = UI [\cos(-\pi/2) - \cos(2\omega t + \pi/2)] = UI \sin 2\omega t.$$

График мгновенной реактивной мощности показан на рис. 1.6, б. В первую четверть периода направления u и i совпадают и $p > 0$, т.е. катушка потребляет электрическую энергию от источника. Потребляемая энергия запасается в магнитном поле, энергия

$W_m = \frac{Li^2}{2}$ которого в рассматриваемом интервале времени увели-

чивается, так как ток i возрастает. В момент времени $t = \frac{T}{4}$ ток и

энергия достигают максимального значения. Энергия, запасаемая в магнитном поле, максимальна. Она пропорциональна площади, ограниченной на рис. 1.6,б первой положительной полуволной синусоиды мощности и осью абсцисс. Во вторую четверть периода направления u и i противоположны $p < 0$, т.е. индуктивный элемент является источником и высвобождает энергию, запасенную в магнитном поле. Действительно, в этот промежуток времени ток уменьшается по модулю и, следовательно, энергия, запасенная в

магнитном поле, также уменьшается. К моменту времени $t = \frac{T}{2}$,

когда ток примет нулевое значение, весь запас энергии будет возвращен источнику и $W_m = 0$. Далее процесс повторяется при отрицательных значениях тока.

Активная мощность P , характеризующая необратимые преобразования энергии и определяемая средним значением мгновенной мощности за период, для катушки как индуктивного элемента равна нулю:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t \cdot dt = 0.$$

Таким образом, в цепи с идеальным индуктивным элементом происходит только периодический обмен энергией между источником и магнитным полем. Интенсивность обмена энергией принято характеризовать наибольшим значением мгновенной мощности, которое называют *реактивной мощностью*: $Q_1 = UI = X_1 I^2$.

Единице реактивной мощности присвоено наименование вольт-ампер реактивный (вар). Если имеются две индуктивные катушки с магнитной связью, т.е. расположенные достаточно близко друг к другу (рис.1.7), и в одной из катушек создать переменный ток i_1 , то часть силовых линий магнитного поля будет сцеплена с витками второй катушки, что характеризует их взаимную индуктивность M . Эта величина определяет значение потокосцепления второй катуш-

ки с магнитным полем, созданным током первой катушки $\Psi_{2M} = Mi_1$, аналогично тому, как собственная индуктивность L_1 определяет значение потокосцепления самоиндукции $\Psi_{1L} = L_1 I_1$. В соответствии с законом электромагнитной индукции в первой катушке индицируется ЭДС самоиндукции $e_{1L} = -\frac{d\Psi_{1L}}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt}$, а во второй катушке ЭДС взаимной индукции:

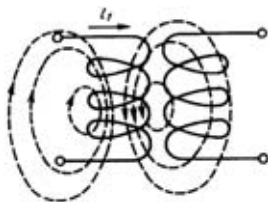
$$e_{2M} = -\frac{d\Psi_{2M}}{dt} = -M \frac{di_1}{dt}.$$


Рис. 1.7. Индуктивные катушки с магнитной связью

Если $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$, то

$$e_{2M} = -M\omega I_{1m} \cos(\omega t + \psi_1) = E_{2Mm} \sin(\omega t + \psi_{eM}),$$

где $E_{2Mm} = M\omega I_{1m}$, $\psi_{eM} = \psi_1 - \pi/2$, т.е. при синусоидальном токе ЭДС взаимной индукции также синусоидальная функция времени. ЭДС взаимной индукции отстает от тока по фазе на угол $\pi/2$. Действующие значения ЭДС взаимной индукции и тока связаны соотношением $E_{2M} = M\omega I_1$. Величину $M\omega$ называют *сопротивлением взаимной индукции* и обозначают $X_M = M\omega$. Соотношение между ЭДС взаимной индукции e_{2M} и током i_1 можно записать и в комплексной форме $\dot{E}_{2M} = -jX_M \dot{I}_1$.

Если переменный ток создан не в первой катушке, а во второй, то потокосцепления обеих катушек будут определяться магнитным полем, созданным током i_2 . При этом $\Psi_{2L} = L_2 i_2$, $\Psi_{1M} = Mi_2$, а $e_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt}$, $e_{1M} = -M \frac{di_2}{dt}$, или $\dot{E}_{1M} = -jM\omega \dot{I}_2 = -jX_M \dot{I}_2$.

В общем случае переменный ток может возникать в обеих катушках, тогда значения результирующего потокосцепления каждой катушки Ψ_1 и Ψ_2 определяются как потокосцеплением самоиндукции, так и потокосцеплением взаимной индукции. При этом возможны два случая включения катушек:

а) если потокосцепление взаимной индукции суммируется с потокосцеплением самоиндукции, т. е. $\Psi_1 = \Psi_{1L} + \Psi_{1M}$, $\Psi_2 = \Psi_{2L} + \Psi_{2M}$ и соответственно результирующая ЭДС каждой из катушек определяется выражениями $e_1 = e_{1L} + e_{1M}$, $e_2 = e_{2L} + e_{2M}$, то такое включение катушек называют *согласным*;

б) если для потокосцеплений и ЭДС справедливы соотношения $\Psi_1 = \Psi_{1L} - \Psi_{1M}$, $\Psi_2 = \Psi_{2L} - \Psi_{2M}$ и $e_1 = e_{1L} - e_{1M}$, $e_2 = e_{2L} - e_{2M}$, то включение катушек называют *встречным*.

Рассмотрим согласное и встречное включение катушек (рис. 1.8). Намотка катушек на рис. 1.8,а проведено в одном направлении. Если проследить за намоткой катушек сверху вниз, то можно увидеть, что для обеих катушек она осуществлена против часовой стрелки, а намотка катушек на рис. 1.8,б – в противоположных направлениях. Видно, что катушки соединены последовательно и подключены к внешнему источнику ЭДС (положительные направления токов показаны на рисунке стрелками).

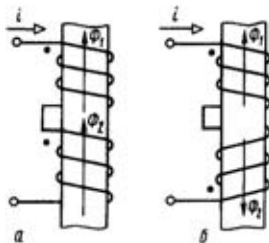


Рис. 1.8. Магнитно-связанные соосные катушки при согласном (а) и встречном (б) включении

Ориентируясь на положительные направления токов и направления намотки катушек и воспользовавшись правилом правоходного винта, можно определить направления магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 , создаваемых каждой катушкой. Нетрудно видеть, что катушки на рис. 1.8,а включены согласно, а на рис. 1.8,б – встречно.

Выводы магнитно-связанных индуктивных катушек принято маркировать. При этом вводят понятия одноименных выводов (зажимов), которые помечают точками. Одноименные зажимы определяют следующим образом.

При согласном включении токи в катушках должны быть одинаково ориентированы относительно одноименных зажимов. Например, в катушках, показанных на рис. 1.8,*а*, одноименными можно считать верхние выводы и пометить их точками.

При встречном включении токи катушек ориентированы в противоположных направлениях относительно одноименных зажимов (рис. 1.8,*б*).

1.4. Активное, реактивное и полное сопротивления

На любом участке электрической цепи переменного тока одновременно осуществляются необратимые процессы преобразования электрической энергии в другие виды энергии (тепловую, механическую, световую и др.) и проявляются действия переменного электромагнитного поля, т.е. возникают токи смещения и ЭДС самоиндукции.

На повышенных и высоких частотах активное сопротивление резистивного (рис. 1.9,*а*) элемента может быть существенно больше сопротивления этого элемента постоянному току. Это происходит из-за явления поверхностного эффекта, суть которого заключается в том, что центральная область проводника охвачена наибольшим количеством силовых линий переменного магнитного поля, которое создает в этой области наибольшую ЭДС самоиндукции, направленную против направления тока и уменьшающую его плотность. Поверхностная область проводника охвачена только внешними силовыми магнитными линиями, поэтому противо-ЭДС самоиндукции в поверхностной области проводника будет меньшей, а следовательно, и меньшим будет ослабление плотности тока в этой части сечения проводника. В соответствии с этим явлением плотность тока J в центре проводника будет минимальной, а у поверхности – максимальной, т.е. ток как бы вытесняется на поверхность проводника (рис. 1.10,*а*). Причем чем выше частота переменного тока, тем этот процесс протекает активнее.

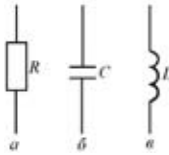


Рис. 1.9. Изображения элементов: резистивного (а), емкостного (б) и индуктивного (в)

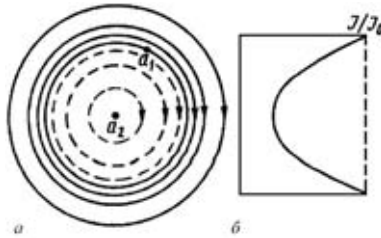


Рис. 1.10. Магнитное поле проводника с током (а), график изменения относительной плотности тока J/J_0 в сечении проводника (б)

На рис. 1.10,б показан график изменения относительной плотности тока J/J_0 в сечении проводника, причем J_0 – плотность тока в поверхностном слое цилиндрического проводника.

Вытеснение тока на поверхность проводника равнозначно уменьшению его полезного сечения, т.е. увеличению его активного сопротивления. Поэтому активное сопротивление проводника больше его сопротивления на постоянном токе. Эта разница зависит от частоты тока, формы и материала проводника. Так, в медных, алюминиевых проводах диаметром до 1 см на частоте 50 Гц разница между активным сопротивлением и сопротивлением постоянному току незначительна, т.е. в этих случаях явлением поверхностного эффекта можно пренебречь.

На высоких частотах поверхностный эффект проявляет себя настолько существенно, что ток во внутренней области проводника практически отсутствует, поэтому в технике высоких частот часто используют полые провода. Явление поверхностного эффекта приходится иногда учитывать и в вихретоковом контроле.

Реальная индуктивная катушка обладает активным R и индуктивным X_L сопротивлениями. Полное сопротивление катушки в комплексной форме записывается так: $Z_k = R + jX_L = Z_k e^{j\varphi}$, где

модуль этого сопротивления $Z_k = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, а аргумент $\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$.

Индуктивное сопротивление X_L в отличие от активного называют *реактивным сопротивлением*.

Другим реактивным сопротивлением является емкостное сопротивление X_C , учитывающее токи смещения определенного участка цепи. Как известно, любые два проводника, расположенные на некотором расстоянии друг от друга, обладают определенной электрической емкостью C , единицей емкости является фарада (Ф). Если к проводникам подведено напряжение u источника электрической энергии, то оно вызовет появление на них электрического заряда $Q = Cu$.

Если среда между проводниками является диэлектриком, то электрическое поле, созданное напряжением, приложенным к проводникам, поляризует диэлектрик. При изменении во времени напряжения u изменяются заряды на проводниках, напряженность электрического поля и электрическая поляризация диэлектрика. При этом в диэлектрике возникает электрический ток смещения $i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{du}{dt}$. В этом случае в источнике электрической энергии образуется ток проводимости, равный току смещения в диэлектрике. Если к емкостному элементу (рис. 1.11,а) подключено синусоидальное напряжение $u = U_m \times \sin(\omega t + \psi_u)$, то в нем возникает ток:

$$i = C \frac{du}{dt} = C\omega U_m \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

где $I_m = C\omega U_m$, $\psi_i = \psi_u + \pi/2$.

Графики мгновенных значений напряжения u , тока i , мощности p для случая $\psi_i = 0$ приведены на рис. 1.11,б. При синусоидальном напряжении ток емкостного элемента также синусоидален и опережает напряжение на четверть периода, т.е. угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$. Амплитудные значения тока и напряжения

связаны соотношениями $I_m = C\omega U_m$ или $U_m = \frac{1}{C\omega} I_m$. Величину

$\frac{1}{C\omega}$, имеющую размерность Ом, обозначают X_C и называют *емкостным сопротивлением*. Закон Ома для амплитудных значений тока и напряжения емкостного элемента описывается выражением $U_m = X_C I_m$. Очевидно, что закон Ома можно записать и для действующих значений: $U = X_C I$; в комплексной форме можно представить, используя показательную форму записи комплексных амплитуд напряжения $\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u}$ и тока $\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i} = I_m e^{j(\psi_u + \pi/2)}$. Тогда комплексное сопротивление

$$\underline{Z}_C = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = X_C e^{-j\frac{\pi}{2}} = -jX_C = -j\frac{1}{C\omega}.$$

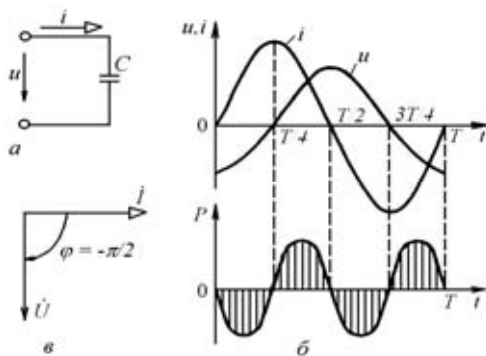


Рис. 1.11. Схема цепи с емкостным элементом (а), графики мгновенных значений напряжения, тока и мощности (б), векторная диаграмма (в)

Мгновенная мощность емкостного элемента (рис. 1.11,а): $p = ui = U_m I_m \sin(\omega t - \pi/2) \sin \omega t = UI \sin 2\omega t$.

В первую четверть периода ток и напряжение имеют противоположные знаки и мгновенная мощность $p = ui$ отрицательна, т.е. энергия, запасенная в электрическом поле, убывает и возвращается источнику электрической энергии.

Максимальная энергия электрического поля $W = Cu^2/2$ соответствует моменту времени $t = 0$, когда напряжение имеет амплитудное значение. К моменту времени $t = \frac{T}{4}$ напряжение становится

ся равным нулю и вся энергия, запасенная в электрическом поле, возвращена источнику электрической энергии. Во вторую четверть периода ток и напряжение совпадают по знаку, $p > 0$, т.е. емкостный элемент запасает энергию в электрическом поле. Максимум этой энергии соответствует моменту $t = \frac{T}{2}$. Далее описанные процессы повторяются (рис. 1.11,б).

Активная мощность, характеризующая необратимые процессы преобразования энергии и определяемая средним значением мгновенной мощности за период для идеального емкостного элемента,

равна нулю $p = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int UI \sin 2\omega t dt = 0$. Таким образом, в

цепи с емкостным элементом происходит периодический обмен энергией между источником электрической энергии и электрическим полем емкостного элемента. Интенсивность этого обмена энергией принято характеризовать амплитудным значением мгновенной мощности, которое называют *реактивной мощностью*:

$$Q_C = UI = X_C I^2.$$

Реактивная мощность емкостного элемента так же как и индуктивного элемента измеряется в вольт-амперах реактивных (вар).

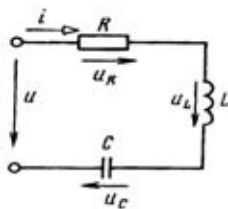


Рис. 1.12. Схема цепи с последовательным соединением элементов

При последовательном соединении резистивного, индуктивного и емкостного элементов (рис. 1.12) полное комплексное сопротивление цепи равно $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = Ze^{j\varphi}$. Здесь модуль

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \text{ а аргумент } \varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}.$$

1.5. Вихревые токи и поверхностный эффект в проводящих изделиях

Впервые вихревые токи были обнаружены французским ученым Д.Ф.Араго (1786 – 1853) в 1824 г. в медном диске, расположенном на оси под вращающейся магнитной стрелкой. За счет вихревых токов диск приходил во вращение. Это явление, названное *явлением Араго*, было объяснено несколько лет спустя М.Фарадеем с позиций открытого им закона электромагнитной индукции: вращаемое магнитное поле наводит в медном диске вихревые токи, которые взаимодействуют с магнитной стрелкой. Вихревые токи были исследованы французским физиком Ж.Б.Фуко (1819 – 1868). Он открыл явление нагревания металлических тел, вращаемых в магнитном поле.

Вихревые токи возникают в проводящих телах как вследствие изменения магнитного потока во времени, так и в результате относительного перемещения проводящего тела и магнитного потока.

Согласно закону Ленца переменное магнитное поле вихревых токов стремится противодействовать изменениям магнитного потока, индуцирующего вихревые токи, вследствие чего они оказывают размагничивающее действие на источник переменного магнитного потока, в том числе и на возбуждающую катушку, уменьшая ее собственную индуктивность.

Для уменьшения потерь энергии от вихревых токов магнитопроводы электрических машин и трансформаторы изготавливают из тонких изолированных листов электротехнической стали, для увеличения удельного электрического сопротивления которой добавляют к железу 2 – 4 % кремния.

Вихревые токи вызывают неравномерное распределение напряженности магнитного поля в проводящем изделии, в котором они возникают. Это объясняется тем, что в центральной части сечения этого изделия магнитодвижущая сила вихревых токов, направленная навстречу основному магнитному потоку, является наибольшей, так как эта часть сечения охватывается наибольшим количеством контуров вихревых токов. Такое вытеснение магнитного потока из середины сечения изделия к его поверхности будет тем больше, чем выше частота переменного тока и чем больше магнитная проницаемость μ_a материала объекта контроля. При

высоких частотах магнитный поток проходит лишь в тонком поверхностном слое.

По своему характеру явление вытеснения магнитного потока аналогично поверхностному эффекту вытеснения тока, называемого *магнитным поверхностным эффектом*. Явление магнитного поверхностного эффекта находит широкое применение в индукционном нагреве для плавки и поверхностной закалки металлов.

Распределение плотности вихревых токов в проводящем объекте контроля определяется геометрическими и электромагнитными параметрами ОК, взаимным расположением ВТП и ОК.

Принцип действия вихретокового контроля отображен с помощью схемы, представленной на рис. 1.13. На ней показан генератор переменного тока, обмотки ВТП: возбуждающая, подключенная к генератору, и измерительная, соединенная с блоком измерения, предназначенным для выделения и обработки сигналов, несущих информацию об измеряемом параметре ОК [1, 4].

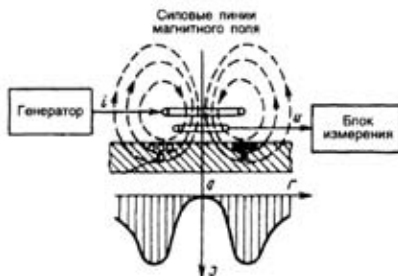


Рис. 1.13. Схема принципа действия прибора с накладным ВТП

На рис. 1.13 показан также ориентировочный график распределения плотности вихревых токов в ОК. Из графика видно, что максимального значения плотность вихревых токов достигает под витками возбуждающей обмотки. Под центром возбуждающей обмотки ВТП вихревые токи отсутствуют, а следовательно, обнаружить дефект в этом месте ОК не представляется возможным.

Воздушный трансформатор (рис. 1.14,а) можно представить схемой замещения (рис. 1.14,б), на которой R_{BH} – вносимое в катушку активное сопротивление, обусловленное потерями энергии в результате нагрева ОК вихревыми токами; L_{BH} – вносимая индуктивность, обусловленная изменением потокосцепления индуктивной катушки (обмотки возбуждения ВТП) за счет действия вихре-

вых токов. Поскольку потокосцепление Ψ из-за действия вихревых токов изменяется, индуктивность катушки при наличии вблизи нее электропроводящего ОК также изменится. Параметры R_{BH} и L_{BH} зависят от плотности и распределения вихревых токов в ОК.

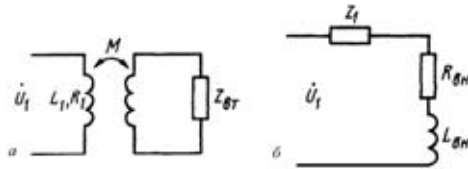


Рис. 1.14. Воздушный трансформатор (а) и его схема замещения (б)

Существует несколько классифицированных признаков преобразования параметров ОК в выходной сигнал (рис. 1.15).



Рис. 1.15. Типы вихретоковых преобразователей

Параметрический ВТП имеет одну возбуждающую обмотку, параметры которой (активное и индуктивное сопротивления) зависят от параметров ОК, температуры окружающей среды и расстояния между ВТП и ОК. Трансформаторный ВТП помимо возбуждающей обмотки имеет измерительную обмотку, ЭДС которой зависит только от параметров ОК. Преимущество параметрических ВТП заключается в их простоте, а недостаток – в зависимости выходного сигнала от температуры преобразователя.

ВТП подразделяются на параметрические и трансформаторные [1, 6].

По способу измерения и соединения катушек ВТП делят на абсолютные и дифференциальные. *Абсолютным* называется ВТП,

выходной сигнал которого определяется абсолютными значениями параметров ОК в зоне контроля (рис. 1.16,*а*). *Дифференциальным* ВТП принято называть, по существу, совокупность двух абсолютных ВТП (рис. 1.16,*б*). В дифференциальном ВТП обмотки возбуждения 2 включены последовательно согласно, а измерительные 3 – встречно. Выходной сигнал такого ВТП определяется разностью значений параметров объекта, измеряемых в зоне расположения измерительных обмоток.

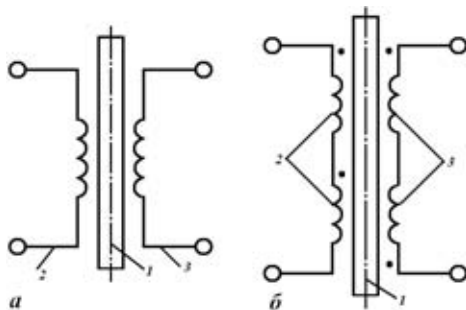


Рис. 1.16. Абсолютный (*а*) и дифференциальный (*б*) трансформаторные ВТП: 1 – ОК; 2 – возбуждающие обмотки; 3 – измерительные обмотки

В зависимости от расположения ВТП по отношению к объекту контроля их делят на проходные, накладные и комбинированные.

Проходные ВТП обычно делятся на наружные, внутренние, погружные и экранные.

На рис. 1.17 показаны разновидности трансформаторных наружных проходных ВТП. Основной их особенностью является то, что катушки ВТП охватывают ОК. Катушки внутренних проходных ВТП вводят внутрь ОК (рис. 1.18), чаще всего они служат для контроля труб.

В экранных проходных ВТП возбуждающие и измерительные катушки располагаются по разные стороны ОК. На рис. 1.19 показаны экранные проходные ВТП. Наружными, внутренними и погружными могут быть как параметрические, так и трансформаторные ВТП, а экранными – только трансформаторные.

К проходным можно отнести и так называемые щелевые ВТП (рис. 1.20) с магнитопроводом 4, охватывающим ОК 3. На рис. 1.20,*а* представлен параметрический щелевой, а на рис. 1.20,*б* – трансформаторный ВТП.

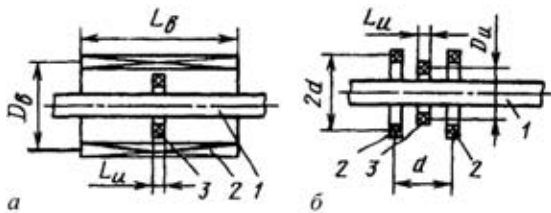


Рис. 1.17. Разновидности наружных проходных ВТП:
 1 – ОК; 2 – возбуждающие и 3 – измерительные катушки;
 L_B, L_U – длина возбуждающей и измерительных обмоток соответственно;
 D_B, D_U – диаметр возбуждающей и измерительных обмоток соответственно;
 d – расстояние между возбуждающими обмотками

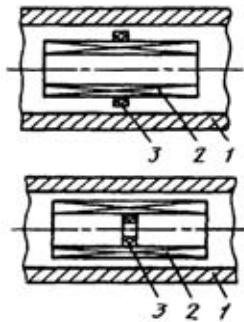


Рис. 1.18. Проходные внутренние ВТП:
 1 – ОК; 2, 3 – возбуждающая и измерительная обмотки соответственно

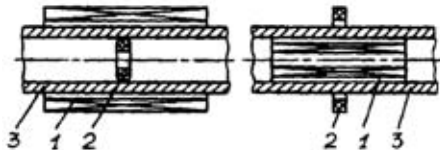


Рис. 1.19. Проходные экранированные преобразователи:
 1 – возбуждающая; 2 – измерительная обмотки; 3 – ОК

Накладные ВТП обладают значительно большими возможностями для контроля, чем проходные.

Они позволяют контролировать геометрические и электромагнитные параметры ОК сложной формы.

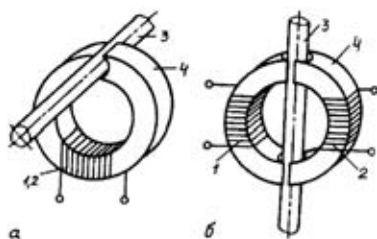


Рис. 1.20. Щелевые ВТП: *а* – параметрический; *б* – трансформаторный; 1 – возбуждающая; 2 – измерительная обмотки; 3 – ОК; 4 – магнитопровод

Катушки накладных ВТП могут быть круглыми коаксиальными, прямоугольными крестообразными (рис. 1.21), с взаимно перпендикулярными осями и др. Накладные ВТП так же, как и проходные, могут быть экранными, когда возбуждающие и измерительные катушки располагаются по разные стороны ОК, например контролируемого листа (рис. 1.21,в). Накладные ВТП выполняют с ферромагнитными сердечниками и без них. Благодаря ферромагнитному сердечнику (обычно ферритовому) повышается чувствительность и формируется электромагнитное поле заданной топологии. На рис. 1.22 приведены разновидности накладных ВТП с ферромагнитными сердечниками для локализации магнитного поля в целях уменьшения зоны контроля, увеличения разрешающей способности.

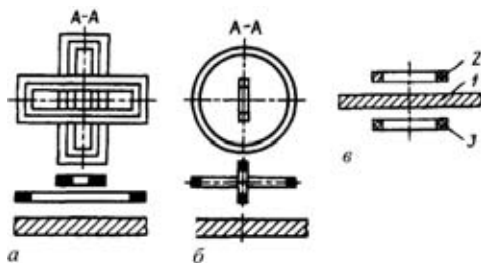


Рис. 1.21. Накладные вихретоковые преобразователи с различными видами катушек: *а* – прямоугольными крестообразными; *б* – с взаимно перпендикулярными осями; *в* – экранный ВТП с расположением возбуждающих 2 и измерительных 3 катушек по разные стороны ОК 1

В накладных ВТП [1] иногда локализация магнитного поля осуществляется благодаря тому, что в воздушный зазор (рис. 1.22,а) вставляется концентратор 5 в виде медной пластинки, которая вытесняет магнитное поле в зону контроля. Используются также магнитопроводы специальной формы (рис. 1.22,б,в), отверстия в не-

ферромагнитном электропроводящем экране 4 (рис. 1.22,з) или короткозамкнутый виток 5 на магнитопроводе 4.

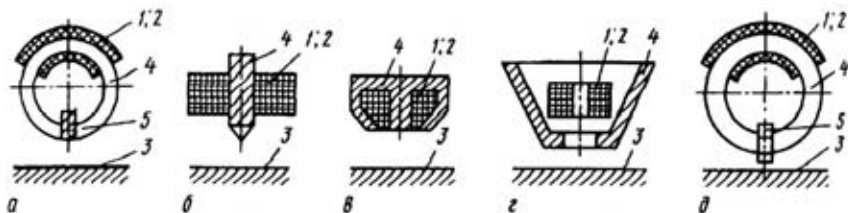


Рис. 1.22. Накладные локальные ВТП: а – с концентратором в виде медной пластинки; б, в – с магнитопроводами специальной формы; з – с отверстием в неферромагнитном электропроводящем экране; д – с короткозамкнутым витком на магнитопроводе; 1, 2 – возбуждающая и измерительная обмотки; 3 – ОК; 4 – магнитопровод; 5 – концентратор

Комбинированные ВТП, охватывающие ОК 1 (рис. 1.23,б), представляют собой комбинацию проходных возбуждающих катушек 2 и накладных измерительных катушек 3.

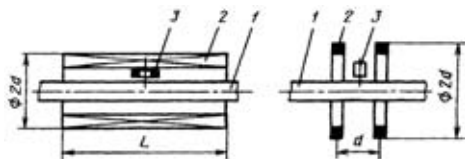


Рис. 1.23. Комбинированные ВТП с проходной возбуждающей и накладной измерительной обмотками: 1 – ОК; 2, 3 – возбуждающие и накладные измерительные катушки соответственно

Наружные проходные ВТП используют для контроля линейно-протяженных объектов (проволоки, прутков, труб и т.п.) и массового контроля мелких изделий. С помощью внутренних проходных ВТП контролируют внутренние поверхности труб, баллонов, а также стенки отверстий в различных деталях.

Погружные ВТП используют для контроля жидких сред, экранные проходные – для контроля труб, щелевые – для контроля проволоки.

ВТП специальной конструкции используют для контроля пространственного положения изделий, измерения параметров вибраций, скорости движения ОК, угловых и линейных смещений контролируемых изделий.

Приведенная классификация ВТП не является исчерпывающей, т.к. конструкций ВТП очень много.

1.6. Накладные вихретоковые преобразователи

Накладные ВТП могут быть параметрическими, имеющими одну обмотку, и трансформаторными с двумя или более обмотками. Параметрические ВТП характеризуются индуктивностью L (индуктивным сопротивлением ωL) и активным сопротивлением R . Трансформаторные ВТП состоят из возбуждающей обмотки, по которой протекает электрический ток, и измерительных обмоток, с которых снимаются напряжения, несущие ту или иную информацию о параметрах объекта контроля. В случае трансформаторного ВТП оценивается не только индуктивность L и активное сопротивление R обмоток, но и взаимоиנדуктивность M (сопротивление взаимоиנדуктивности ωM), связанная обычно с выходным напряжением и его фазой, в виду чего ее значение может представляться комплексным числом.

Параметрический накладной ВТП имеет одну обмотку, представляющую собой, по существу, катушку индуктивности. При поднесении ВТП к ОК в результате появления вторичного магнитного поля вихревых токов его индуктивность изменяется (чаще всего уменьшается), а активное сопротивление из-за потерь энергии от протекающих в ОК вихревых токов увеличивается. По приращению этих параметров можно судить о свойствах контролируемого объекта.

Трансформаторный накладной ВТП с двумя или большим числом обмоток (рис. 1.24,б,в), фактически представляет собой катушку взаимоиנדуктивности в виде воздушного трансформатора или трансформатора с ферромагнитным сердечником. В этом случае чаще всего его выходной величиной является напряжение на обмотках \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , характеризующееся обычно модулем U и фазой φ или действительным $\text{Re}\dot{U}$ и мнимой $\text{Im}\dot{U}$ составляющими напряжения на вторичной обмотке.

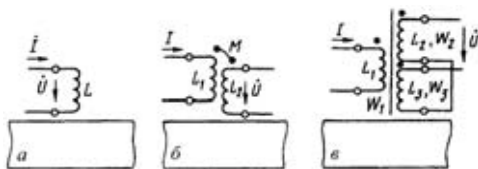


Рис. 1.24. Основные варианты конструкций накладных ВТП:
 а – в виде катушки индуктивности; б – в виде воздушного трансформатора;
 в – в виде трансформатора с ферромагнитным сердечником

При поднесении трансформаторного ВТП к ОК, помимо индуктивности и активного сопротивления, изменяется взаимоиндуктивность M между обмотками (чаще всего уменьшается) и, как следствие, изменяется модуль напряжения на обмотках (U_1, U_2), а из-за задержки во времени изменяются и их фазы φ_1 и φ_2 . По приращению всех этих параметров или их сочетанию можно судить о свойствах контролируемого объекта, что обуславливает большую информационную ценность применения трансформаторных преобразователей.

Кроме того, как правило, параметры трансформаторных ВТП более стабильны и меньше зависят от внешних условий (температуры, влажности и др.), что определяет их широкое использование. С точки зрения вычисления выходных сигналов накладного ВТП при определенных условиях (зазоре, частоте, токе и др.) основной задачей является расчет комплексного вносимого напряжения на измерительной обмотке двухобмоточного ВТП. Чаще других на практике используют катушки с круговыми витками. Типичная конструктивная схема такого ВТП без каркаса, крепежных элементов и расположенного над многослойным ОК приведена на рис.1.25. Непосредственно из данных рис. 1.25 с учетом толщины защитной щечки $C_{защ}$, взаимного расположения $l_{вн}$ и высоты обмоток l_u, l_u можно найти значения зазоров $h_u = h_0 + C_{защ} + 0,5l_u$ и $h_e = h_0 + C_{защ} + 0,5l_u + l_{вн}$.

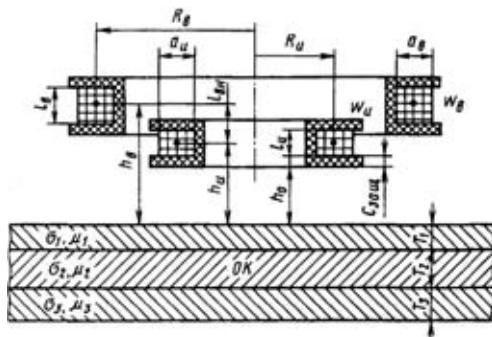


Рис. 1.25. Расчетная модель накладного двухобмоточного ВТП

Если накладной ВТП параметрический, т.е. выполнен однообмоточным ($l_{ви} = 0$; R_u ; $l_g = l_u$; $a_g = a_u$, где a – ширина обмотки), то $h_g = h_u = h_0 + C_{заци} + 0,5l_u$. При выполнении большинства практических расчетов модель накладного ВТП может быть еще более упрощена и заменена двумя коаксиальными витками бесконечно малого поперечного сечения с радиусами R_g и R_u . В этом случае описывающая процесс система дифференциальных уравнений для векторов электромагнитного поля может быть решена путем введения векторного потенциала в цилиндрической системе координат (ρ , φ , Z). В результате решения получено интегральное выражение для выходного напряжения накладного ВТП. Для практических расчетов удобно выделить две составные части напряжения: собственно катушки при отсутствии объекта контроля и вносимое напряжение (приращение), вызванное помещением объекта в измерительную зону накладного ВТП.

Когда ОК вблизи накладного ВТП нет, то начальное напряжение на его измерительной обмотке будет определяться взаимоиндуктивностью M между его катушками: $\dot{U}_2 = \pm j\omega M \dot{I}_1$, причем значение взаимоиндуктивности M можно найти с помощью известных справочных данных [21, 22].

1.7. Контроль электропроводящих изделий большой толщины

Если глубина проникновения электромагнитного поля меньше толщины изделия, то в качестве модели ОК можно принять полупространство.

На рис. 1.26 показаны графики распределения относительного значения $J_* = \frac{J}{IW_g R_g}$ – модуля плотности вихревых токов, возбуждаемых эквивалентным витком, находящимся на малом расстоянии от проводящего ферромагнитного полупространства ($h_g = 0$) в

зависимости от нормированного радиуса $r_* = \frac{r}{R_g}$ (рис. 1.26,а) и

расстояния вдоль оси $z_* = \frac{z}{R_g}$ (рис. 1.26,б) для двух значений

обобщенного параметра $\beta_0 = R\sqrt{\omega\mu_0\sigma}$ (символ * обозначает нормировку по R_0).

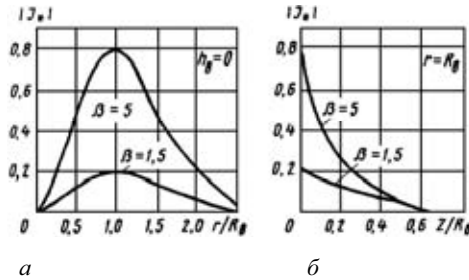


Рис. 1.26. Модуль плотности вихревых токов: *a* – в зависимости от нормированного радиуса и *б* – от расстояния вдоль оси катушки возбуждения

Все геометрические размеры указаны на рис. 1.25.

Пользуясь зависимостями, приведенными на рис. 1.26, можно оценить глубину проникновения вихревых токов в проводящее изделие, причем, глубина проникновения зависит от параметра β , т.е. определяется не только частотой возбуждающего поля, но и радиусом возбуждающей катушки. Для параметра $\beta = 1,5$ относительная глубина проникновения δ_* , определенная из рис. 1.26, как расстояние z_* , на котором J_* уменьшается в e раз, и составляет

0,42. Для плоской волны $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_a\sigma}} = \frac{R_0\sqrt{2}}{\beta}$, т.е. $\delta_* = \frac{\sqrt{2}}{\beta}$, что

дает при $\beta = 1,5$ значение $\delta_* = 0,93$. Такое расхождение (0,42 и 0,93) можно объяснить тем, что при $\beta = 1,5$ поле проникает в материал достаточно глубоко, поэтому уменьшение поля происходит не только из-за действия вихревых токов, но и из-за геометрического спада (удаление от витка). При $\beta = 5,0$ эта разница значительно меньше (0,18 и 0,28).

При достаточно большом значении частоты f возбуждающего тока изменения толщины объекта не влияют на сигнал ВТП, поэтому основным мешающим фактором при проведении контроля будет вариация расстояния между внешней электропроводящей поверхностью контролируемого объекта и накладным ВТП.

Особенности изменения вносимого напряжения от электромагнитных свойств объекта и зазора отражают годографы вносимого напряжения от обобщенных параметров β , μ_r , и h_* . Подробности этих расчетов с использованием функций Бесселя можно найти, например, в книге [1].

На рис. 1.27 изображены годографы относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{вн*}$. Нормировка проведена по модулю наибольшего вносимого напряжения при минимальном зазоре для электропроводящего неферромагнитного ($\mu_r = 1$) полупространства. Эти годографы можно использовать и для параметрического накладного ВТП. Из рисунка видно, что угол между линиями годографов изменения зазора и удельной электрической проводимости достигает 45° , что позволяет рекомендовать амплитудно-фазовый способ их раздельного контроля.

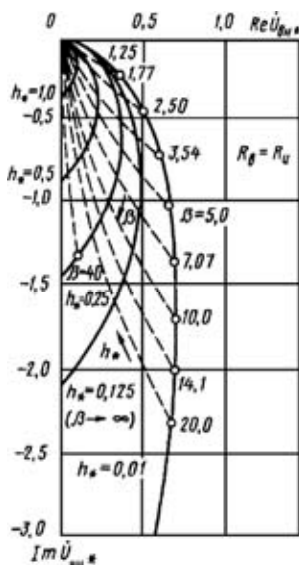


Рис. 1.27. Годографы относительного вносимого напряжения накладного преобразователя, расположенного над электропроводящей немагнитной средой

Годографы вносимого напряжения при изменении зазора (рис.1.27) представляют собой линии небольшой кривизны, сходящиеся в нулевой точке. В первом приближении, а также в случае

небольших относительных изменений зазора эти линии можно рассматривать как прямые, т.е. полагать, что фаза вносимого напряжения зависит только от параметра β и не зависит от h_* .

Представляет практический интерес вопрос чувствительности накладных ВТП к влияющим факторам. Под чувствительностью в данном случае понимают приращение относительного вносимого напряжения, вызванное увеличением влияющего фактора на 1 %. Это позволяет применять чувствительность для анализа выходных сигналов накладного ВТП при небольших (10...20 %) отклонениях контролируемых параметров.

Исследования показали, что для $\beta = 2,5...20$ относительная чувствительность к величине зазора достигает наибольших значений в области $h_* = 0,3...0,6$. Наличие максимума модуля чувствительности приводит к тому, что условия измерения удельной электрической проводимости σ при мешающем влиянии зазора наилучший, если $h_* \approx 0,5$.

В результате увеличения β (рис. 1.27) происходит монотонное ограниченное нарастание абсолютной чувствительности к зазору, что позволяет с учетом снижения влияния отклонений электромагнитных свойств ОК рекомендовать область больших β для контроля толщины диэлектрических покрытий на металлах и сплавах, для измерения вибраций и т.п. При больших значениях β влияние изменений σ уменьшается, и приборы, измеряющие зазор или толщину диэлектрических покрытий, могут быть построены без отстройки от влияния вариаций σ . Вместе с тем при больших зазорах абсолютные значения вносимого напряжения существенно уменьшаются.

Из рис. 1.28 видно, что при наличии ферромагнитного ОК для некоторых значений β и μ_r эффект увеличения магнитного потока, сцепленного с измерительной катушкой накладного ВТП (верхний квадрант комплексной плоскости), преобладает над эффектом ослабления магнитного потока под действием вихревых токов (нижний квадрант). Эффект увеличения магнитного потока у накладных ВТП выражен значительно слабее, чем у проходных, ввиду того, что только меньшая часть магнитного потока связана с контролируемым объектом.

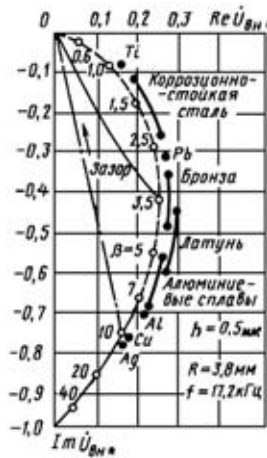


Рис. 1.28. Годографы относительного вносимого напряжения накладного ВТП, расположенного над проводящей ферромагнитной средой

В общем случае данные рис. 1.28 показывают, что при малых β и μ_r возможен отдельный контроль электромагнитных параметров материала σ и μ_r . При увеличении μ_r годографы $\dot{U}_{ВН}(\sigma)$ и $\dot{U}_{ВН}(\mu_r)$ практически сливаются, поэтому обобщенным параметром в этом варианте становится отношение $\beta/\sqrt{\mu_r}$, и отдельный контроль значений удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости вихретоковым методом невозможен.

Важными влияющими факторами, которые могут привести к появлению существенной погрешности, являются геометрические характеристики ОК, например кривизна внешней поверхности ОК или его ограниченные размеры, соизмеримые с диаметром накладного ВТП.

Влияние свойств конкретных материалов из металлов на вносимое напряжение видно из годографов рис. 1.29 при двух значениях зазора.

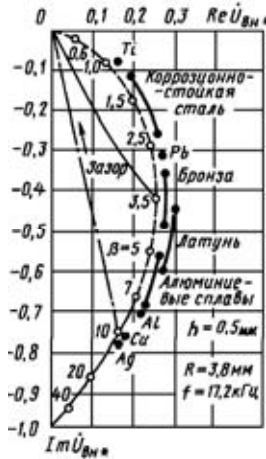


Рис. 1.29. Нормированные годографы вносимого напряжения накладного ВТП для различных материалов

В целом вихретоковый метод следует использовать для контроля неферромагнитных и слабомагнитных электропроводящих материалов ($\mu_r = 1 \dots 10$).

1.8. Контроль толщины диэлектрических покрытий

Измерение толщины диэлектрических покрытий – одна из важных областей применения метода вихревых токов. Изделие чаще всего является неферромагнитным. Толщина диэлектрического покрытия измеряется путем установки накладного ВТП на внешнюю поверхность ОК (рис. 1.25), ($h_0 = 0$, $\sigma_1 = 0$, $\mu_{r1} = 1$), что фактически равносильно увеличению зазора на значение толщины покрытия. Поэтому для получения градуировочной зависимости выходного напряжения накладного ВТП от толщины используют графики вносимой ЭДС от зазора, основанные на данных рис. 1.25.

Основными факторами, создающими погрешность при измерении толщины диэлектрических покрытий, являются: удельная электрическая проводимость металлической основы изделия, возможное несовершенство внешней поверхности объекта контроля (кривизна, выступы, шероховатость и т.п.), а также наличие загрязнений на ней.

Погрешность из-за непостоянства удельной электрической проводимости ОК можно существенно уменьшить, если выбрать большое значение обобщенного параметра β (рис. 1.27), что обеспечивается использованием повышенной частоты тока, питающего обмотку возбуждения накладного ВТП, до значений 5...10 МГц. Конкретные значения рабочей частоты определяются диапазоном измерений толщины и минимальным значением удельной электрической проводимости основания.

Градуировочная зависимость толщиномера диэлектрических покрытий может быть легко получена путем добавления к зазору текущего значения толщины покрытия с помощью расчетных кривых для максимального значения вносимого напряжения, поскольку при $\beta > 20$ вносимое напряжение близко к предельному и отличается лишь комплексным множителем (по модулю чуть меньше единицы). Выбор обмоток накладного ВТП с отличающимися радиусами ($R_e / R_u = 1,4...2$) позволяет иметь более линейную градуировочную характеристику, чем у параметрического ВТП ($R_e / R_u = 1$), и снизить влияние начального напряжения на вторичной обмотке ВТП.

1.9. Контроль листов накладными вихретоковыми преобразователями

Контроль листовых объектов может осуществляться при одностороннем или двустороннем доступе к его внешним поверхностям. Чаще всего подход является односторонним.

На рис. 1.30 представлены годографы $\dot{U}_{BH^*}(\beta, T_*)$ для немагнитного листа ($\mu = 1$), показывающие влияние толщины T удельной электрической проводимости σ и зазора h . Годографы ограничены с одной стороны штрихпунктирной кривой, соответствующей бесконечной толщине листа ($T \rightarrow \infty$, полупространство), а с другой стороны – годографами для бесконечно тонких ($T \rightarrow 0$, $T_* \ll 1$) листов.

Сплошными линиями показаны годографы \dot{U}_{BH^*} при изменении толщины T_* и фиксированном значении удельной электрической проводимости $\sigma(\beta = \text{const})$, штриховыми линиями изображе-

ны годографы \dot{U}_{BH^*} при изменении σ (параметра β) при постоянных значениях толщины листа ($T_* = \text{const}$). Подробности расчета этих кривых можно найти в книге [1].

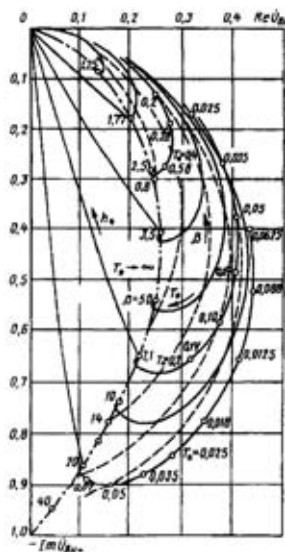


Рис. 1.30. Годографы относительного вносимого напряжения накладного ВТП, расположенного над проводящим неферромагнитным листом

Анализируя приведенные годографы, можно отметить, что при определенных условиях возможен раздельный контроль толщины листа T и удельной электрической проводимости.

1.10. Спектральные составляющие сигналов ВТП

При спектральном анализе в процессе воздействия монохроматического электромагнитного поля на ОК в сигналах измерительных преобразователей появляются составляющие частот, отличающиеся от частоты первой гармоники генератора. Это может происходить из-за проявления нелинейных свойств материала изделия или в результате изменения во времени каких-либо факторов контроля.

В первом случае возникают кратные гармоники основной частоты, которые несут дополнительную информацию о свойствах объекта. Метод, основанный на анализе параметров кратных гармонических составляющих, называется методом *высших гармоник*. Он применяется при контроле ферромагнитных объектов.

Во втором случае модулируется выходное напряжение изменяющимися параметрами объекта, а ширина спектра побочных частот составляет часть спектра частот несущей составляющей. Метод, основанный на обработке спектра модуляционных колебаний, называют *модуляционным анализом*.

Метод высших гармоник состоит в возбуждении синусоидального поля с большой амплитудой напряженности магнитного поля так, чтобы проявлялись нелинейные свойства материала ОК, и в последующем анализе высших гармоник. Специфичная особенность метода высших гармоник состоит в необходимости выделения отдельных гармоник, для чего применяют различные фильтры и измерительные усилители. Обычно анализируют амплитуду или амплитуду и фазу третьей (или пятой) гармоники.

Модуляционный метод обычно используется в дефектоскопии для оценки пространственного распределения свойств ОК. Если взаимно перемещать измерительный преобразователь и ОК, то изменение свойств изделия, распределенные в пространстве, повлекут изменение сигналов во времени. На этом основаны все практические реализации модуляционного метода для контроля протяженных изделий: труб, прутков, проволоки, листов и т.д. Полученный от преобразователей сигнал усиливается и детектируется, а затем анализируется огибающая высокочастотных колебаний.

Возможность раздельного контроля различных факторов определяется различием формы импульсов сигналов, что приводит к появлению соответствующих вариаций в их спектре.

На рис. 1.31 представлены формы и спектры сигналов дифференциального проходного ВТП от точечного дефекта глубиной $h_* = 0,05$ для различных v_* при $\eta = 0,36$ и $0,81$. На рис. 1.31,а кривые $U_*(t)$ нормированы по начальному напряжению, а кривые U_* на рис. 1.31,б – по максимальному значению спектра сигнала абсолютного проходного ВТП.

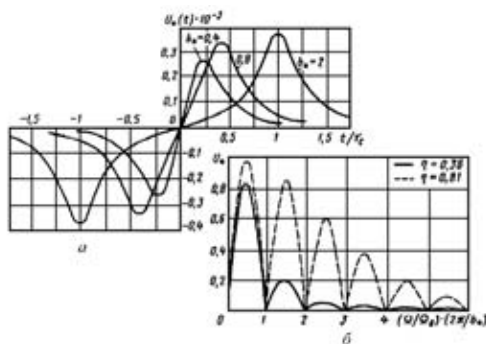


Рис. 1.31. Сигналы дифференциального проходного ВТП от точечных дефектов: *a* – форма; *б* – спектры

Для повышения отношения сигнал/помеха целесообразно уменьшать измерительную базу. При этом ослабляются помехи, вызванные, например, изменениями диаметра ОК или неравномерностью его удельной электрической проводимости. Однако при этом следует иметь в виду, что с уменьшением измерительной базы уменьшаются зона контроля и значение U_{\max} . Так из зоны контроля измерительных катушек дифференциального проходного ВТП $b_* = 0,25 \dots 0,5$, при этом U_{\max} уменьшается не более чем на 30 % от U_{\max} , соответствующего $b_* \gg 1$.

Увеличение глубины дефекта h_* от 0,025 до 0,2 несущественно влияет на форму импульсов напряжения, изменяется только значение U_{\max} . Уменьшение коэффициента заполнения η приводит к существенному уменьшению длительности импульса от точечных дефектов.

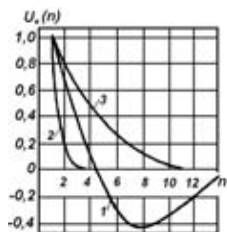


Рис. 1.32. Спектр огибающей модулированного напряжения накладного ВТП для дефектов: 1 – точечного; 2 – продольного; 3 – поперечного

На рис. 1.32 показаны спектры огибающей модулированного напряжения накладного ВТП $U_*(n)$, где n – номер гармоники для точечного, продольного и поперечного дефектов. Под продольными понимают дефекты, ориентированные вдоль направления движения оси ВТП, а под поперечными – ориентированные поперек этого направления.

1.11. Дефектоскопия накладными ВТП

Сигналы накладных ВТП от дефектов, как и сигналы проходных ВТП, зависят от геометрических параметров дефекта и его ориентации относительно ВТП, его параметров, тока возбуждения. Кроме того, на сигналы накладных ВТП влияют форма и кривизна поверхности объекта в зоне контроля, а также зазор между ВТП и ОК.

На рис. 1.33 показаны графики зависимости $\Delta U_*(\beta, h_*)$ и $\Delta U_*(\beta, \delta_*)$, из которых видно, что максимальные приращения напряжения от поверхностных дефектов получены при $\beta = 6 \dots 10$.

При использовании в дефектоскопах накладных ВТП для уменьшения влияния зазора очень часто применяют амплитудно-фазовый способ выделения информации. В связи с этим представляет интерес зависимость проекции ΔU приращения напряжения на направление вектора опорного напряжения, перпендикулярное линии влияния зазора.

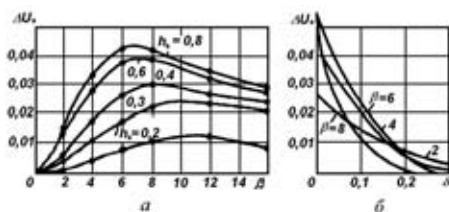


Рис. 1.33. Зависимости сигналов накладного ВТП, обусловленные дефектами:

a – от обобщенного параметра β ; b – от глубины залегания дефектов δ_*

Зависимости, приведенные на рис. 1.33, показывают, что чувствительность накладного ВТП к дефектам определяется размерами дефектов, отнесенными к эквивалентному диаметру преобразователя. Отсюда следует вывод, что для обнаружения мелких дефектов

необходимо уменьшать диаметр ВТП. В этом состоит одно из важнейших преимуществ накладного ВТП по сравнению с проходным.

Для осуществления контроля прежде всего следует настроить вихретоковый дефектоскоп. Для этой цели можно использовать стандартный образец или бездефектный участок поверхности контролируемой детали.

Стандартные образцы первого типа СО1 предназначены для определения работоспособности и пороговой чувствительности вихретоковых дефектоскопов. Целесообразно использовать два образца.

Первый образец СО1 № 1 (рис. 1.34) применяется для определения чувствительности при контроле изделий плоской формы.

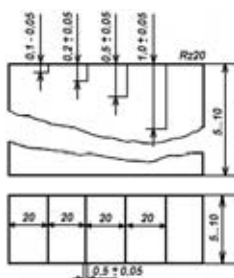


Рис. 1.34. Образец СО1 № 1 для определения чувствительности при контроле плоской поверхности

Второй образец СО1 № 2 (рис. 1.35) – используется для определения чувствительности при контроле ребер или краев деталей.

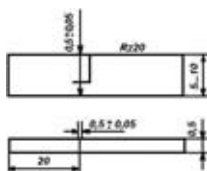


Рис. 1.35. Образец СО1 № 2 для определения чувствительности при контроле ребра

Стандартные образцы СО1 должны изготавливаться из материалов, отличающихся не более, чем на 10...20 % по электрическим и магнитным свойствам от свойств материала ОК. Прорезы, имитирующие поверхностный дефект, создают электроэрозионным методом.

Стандартные образцы второго типа СО2 изготавливают из материала ОК или подбирают из образцов ОК с реальными дефекта-

ми. Эти образцы должны соответствовать характерным геометрическим параметрам ОК.

Контроль края детали проводится при перемещении преобразователя вдоль края при обязательном поддержании постоянным расстояния от края. Для этой цели рекомендуется использовать специально изготовленные насадки.

Приближение преобразователя к краю детали ближе, чем на $1...1,5$ диаметра сердечника преобразователя приводит к нарушению настройки дефектоскопа. В некоторых дефектоскопах предусмотрена сигнализация о приближении к краю, в других влияние краевой зоны вызывает срабатывание сигнализации об изменении зазора. Чувствительность дефектоскопов при настройке на участке краевой зоны не снижается по сравнению с настройкой чувствительности на плоских участках. Дефекты, выходящие на кромку, часто выявляются лучше, чем на плоской поверхности. Следует иметь в виду, что чувствительность может значительно меняться при изменении наклона преобразователя, поэтому при контроле краевой зоны обязательно применение насадок для фиксации положения преобразователя.

При массовом контроле краев отверстий вокруг винтов, болтов, заклепок целесообразно использовать преобразователь в специальном держателе (рис. 1.36).

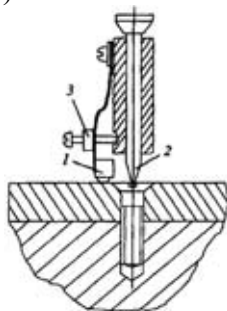


Рис. 1.36. Конструкция преобразователя для контроля краев отверстий вокруг винтов, болтов, заклепок: 1 – преобразователь; 2 – опора; 3 – регулятор радиуса контроля

При контроле ступиц по окружности через $10...40$ мм в зависимости от диаметра выделяют зоны контроля нанесением прямых линий длиной $15...20$ мм в направлении образующей цилиндра (рис. 1.37).

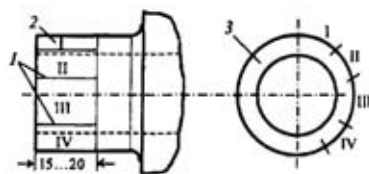


Рис. 1.37. Выделение участков на ступице для настройки и контроля:
 1 – границы выделенных участков; 2 – области контроля (I, II, III и IV);
 3 – торец ступицы

Установив преобразователь в одной из зон контроля перпендикулярно поверхности на расстоянии не ближе 5...10 мм к торцу ступицы, настраиваем дефектоскоп.

1.12. Требования, предъявляемые к вихретоковым дефектоскопам универсального типа

Универсальные вихретоковые дефектоскопы [24] должны обеспечивать:

- запоминание полученных дефектограмм в файлах стандартных форматов и передачу их в персональный компьютер или принтер;
- автоматизацию настройки дефектоскопа и возможность их запоминания;
- применение цифровых методов обработки сигналов на основе встроенного процессора;
- использование 2, 4 и более независимых каналов;
- возможность контроля в статическом или динамическом режимах;
- возможность подключения преобразователей разного типа (параметрических, трансформаторных, абсолютных, дифференциальных);
- представление информации как в комплексной плоскости, с временной развертки и т.п.;
- автоматическое срабатывание сигнализации при попадании годографа сигнала в окно комплексной плоскости, границы и конфигурации которого могут регулироваться;
- одновременное использование до 4-х рабочих частот;
- диапазон рабочих частот от единиц герц до нескольких мегагерц;
- использование люминесцентного или жидкокристаллического дисплея.

Примером такого дефектоскопа [24] является ВДЗ-71(рис. 1.38). Он удобен при создании автоматизированных систем контроля. Дефектоскоп ВДЗ-71 обеспечивает работу на 2-х частотах. Диапазон рабочих частот выбирается в пределах от 500 Гц до 6 МГц, что позволяет подключать высокочастотные и низкочастотные ВТП и решать задачи обнаружения как поверхностных, так и подповерхностных дефектов. За счет регулировки усиления и напряжения возбуждения ВТП обеспечивается возможность работы с абсолютными и дифференциальными, параметрическими и трансформаторными ВТП, изготавливаемыми различными фирмами.



Рис. 1.38. Внешний вид вихретокового дефектоскопа ВДЗ-71

Дисплей прибора позволяет воспроизводить значения рабочих частот, частоты дискретизации, напряжения возбуждения, масштаб и фазу (угол поворота комплексной плоскости). Прокручивание изображений позволяет воспроизводить на экране дисплея до 3 страниц. Каждая страница позволяет отобразить 1 зону отображения и 2 временные развертки. Каждая из зон отображения позволяет отображать вихретоковый сигнал в следующих представлениях: векторное отображение сигналов или комплексная плоскость. Частота дискретизации регулируется оператором и может составлять до 3000 выборок в секунду. Имеется режим автоматического измерения амплитуды или фазы сигнала для дефектов разной глубины с запоминанием соответствующей калибровочной кривой, которая используется для последующей оценки величины дефекта в процессе контроля. В дефектоскопе ВДЗ-71 также предусмотрено создание до 4-х «рамок» сигнализации. Эти рамки и сигнал в совокупности формируют событие (например, превышение сигналом порогового уровня), которое может сопровождаться звуковым сигналом, подсветкой светодиодов на панели прибора, сигнализацией при помощи программных индикаторов или комбинацией вышеперечисленных реакций. Дефектоскоп обладает способностью созда-

ния смесей двух каналов. Для смешивания оператор может выбрать один из пяти алгоритмов: суммирование, вычитание, суммирование с инверсией по горизонтали и суммирование с инверсией по вертикали, произведение.

Дефектоскоп обеспечивает фильтрацию сигнала ВТП в реальном времени с помощью НЧ и ВЧ фильтров. Имеется возможность запоминания до 100 настроек и 10 результатов контроля.

Вихретоковый метод особенно эффективен при обнаружении дефектов в многослойных авиационных конструкциях, под слоем герметика или краски, в отверстиях, в зоне заклепок, в том числе под ее головкой и пр.

Дефектоскопы для контроля объектов с плоскими поверхностями и объектов сложной формы обычно комплектуются накладными ВТП. Основным мешающим фактором при работе с такими дефектоскопами – изменения зазора между ВТП и поверхностью ОК. Для ослабления влияния этого фактора на результаты контроля применяют конструкции ВТП с подпружиненными катушками, а также различные способы обработки информации (амплитудно-фазовый, фазовый, частотный и др.).

Наиболее простая принципиальная электрическая схема дефектоскопов, в которых ВТП используется в качестве индуктивного элемента резонансного контура автогенератора (рис. 1.39).

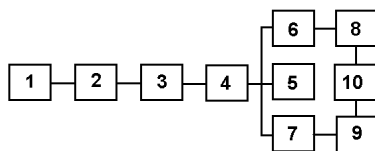


Рис. 1.39. Структурная схема автогенераторного дефектоскопа

Автогенератор 1 через буферный каскад 2 связан с амплитудным детектором 3. Постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде напряжения автогенератора, усиливается усилителем постоянного тока 4, к выходу которого подключен стрелочный индикатор 5, а также пороговые устройства 6 и 7, управляющие работой генераторов звуковой частоты 8 и 9. К выходам генераторов 8 и 9 подключены головные телефоны 10. Генераторы вырабатывают напряжения различных частот, например 1000 и 400 Гц.

Автогенератор настраивается переключением конденсаторов в резонансном контуре на определенную частоту f , соответствующую электромагнитным параметрам материала ОК.

Регулируя емкость переменного конденсатора с помощью выведенной на переднюю панель прибора ручки, изменяют коэффициент положительной обратной связи до тех пор, пока амплитуда напряжения автогенератора не будет установлена в заданных пределах, соответствующих установке ВТП на бездефектный участок ОК. При этом частота f должна быть такой, чтобы при соответствующем ей значении обобщенного параметра комплексное сопротивление обмотки параметрического ВТП определялось точкой A (рис. 1.40). Тогда при появлении дефекта в зоне ВТП точка, определяющая комплексное сопротивление Z , перемещается в положение B , активная составляющая R сопротивления Z возрастает, добротность контура автогенератора и соответственно амплитуда напряжения автогенератора уменьшаются. При этом срабатывает (рис. 1.39) пороговое устройство 6, реагирующее на уменьшение уровня, запускается звуковой генератор 8 и через наушники прослушивается звук определенной тональности. Если же увеличивается зазор между ВТП и поверхностью ОК, то точка в плоскости Z перемещается в положение C , активная составляющая R уменьшается, добротность контура и амплитуда напряжения автогенератора возрастают. Это приводит к срабатыванию порогового устройства 7 и запуску звукового генератора 9. Через наушники прослушивается звук другой тональности. Это позволяет разделить влияние дефекта и зазора.

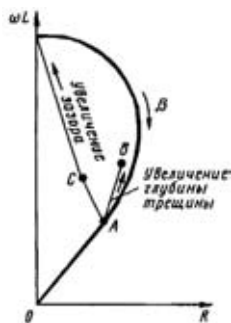


Рис. 1.40. К пояснению способа разделения влияния дефекта и зазора на комплексное сопротивление параметрического ВТП

1.13. Вихретоковые толщиномеры

Вихретоковые толщиномеры – это приборы для измерения толщины объектов и их покрытий. Объектами контроля могут быть:

- изоляционные покрытия на электропроводящих основаниях, например лакокрасочные, эмалевые, пластиковые, стеклянные, резиновые покрытия на металлах и сплавах;

- электропроводящие покрытия на изоляционных основаниях, например медные слои на стеклотекстолитовых печатных платах; алюминиевые покрытия на стекле (зеркала) и пластиках;

- электропроводящие покрытия на электропроводящих основаниях, например, антикоррозионные слои алюминия на алюминиевых сплавах, нанесенные плакированием.

В зависимости от назначения и характеристик ОК толщиномеры подразделяются на толщиномеры для изоляционных покрытий на электропроводящих основаниях, электропроводящих покрытий на изоляционных основаниях и электропроводящих слоев (стенок труб, фольги, лент, листов), электропроводящих покрытий на электропроводящих основаниях.

Специфика вихретоковых толщиномеров заключается в том, что методическая погрешность определяется в значительной степени свойствами ОК и условиями взаимодействия ВТП и ОК. Если инструментальная погрешность может быть уменьшена до вполне приемлемого значения обычными приемами снижения погрешности средства измерения, то с погрешностью, связанной, с ОК, как правило, не удастся справиться так просто. Ее не всегда можно установить достаточно достоверно, поскольку требуются аттестованные образцы толщины покрытий. Их трудно изготовить и аттестовать с погрешностью менее 1 %, а это означает, что погрешность прибора может составлять 3 %, так как по действующим стандартам погрешность образцовых мер должна быть примерно в 3 раза меньше погрешности поверяемого средства измерения. Особенно большие затруднения возникают при аттестации толщиномеров малых толщин покрытий (единицы – десятки микрометров).

Диапазон измеряемых величин обусловлен назначением толщиномера и характеристиками ОК. Для большинства толщиномеров изоляционного покрытия на проводящем основании он составляет от 5 мкм до 2 мм, а в специальных приборах – до 50 и даже до 400 мм; для толщиномеров электропроводящего слоя – от 0,005 до

2 мм; для толщиномеров проводящих покрытий на проводящем основании – от 0,005 мкм до 0,3 мм.

Материалом покрытия могут служить лак, краска, эмаль, стекло, резина, пластмасса, оксидные и фосфатные слои. Если основание выполнено из ферромагнитных материалов, то эффективнее применять магнитные толщиномеры. Типичные неферромагнитные электропроводящие основания – алюминиевые сплавы, латунь, бронза, медь и др.

С точки зрения вихретокового контроля измерение толщины диэлектрика на проводящем основании – это задача измерения зазора между накладными ВТП и поверхностью проводящего основания. Поэтому в этом случае целесообразно выбирать значение обобщенного параметра $\beta = R\sqrt{\omega\mu_a\sigma}$ как можно большим. Ограничение β сверху определяется наибольшим технически достижимым значением частоты тока возбуждения, поскольку при неизменном радиусе R увеличить β можно только увеличивая частоту $f = \omega / 2\pi$. Предельное значение f_{\max} следует выбирать так, чтобы оно не менее чем в 2 раза было ниже собственной резонансной частоты f цепи ВТП с соединительным кабелем. Исходя из этих соображений частоту в толщиномерах изоляционного слоя выбирают в пределах 1...20 МГц, при этом обычно $\beta > 20$. При $\beta > 20$ чувствительность ВТП к изменениям удельной электрической проводимости мала, поэтому в толщиномерах изоляционного слоя обычно влияние изменений удельной проводимости основания подавляется, а в качестве информативного параметра сигнала ВТП используют модуль вектора (амплитуду) напряжения.

Толщиномеры покрытий можно условно разделить на портативные (рис. 1.41) и переносные. В последнее время приборы этого типа часто выполняют как комбинацию вихретоковых и магнитных толщиномеров. С их помощью можно измерять толщину любых изоляционных покрытий на электропроводящих неферромагнитных основаниях и любых неферромагнитных покрытий (изоляционных и проводящих) на ферромагнитных основаниях.

Существует два основных типа портативных толщиномеров: аналоговые и цифровые, причем современные цифровые выполняют на основе микропроцессоров. К преимуществам таких приборов можно отнести:

- упрощенный процесс подготовки прибора к работе;



Рис. 1.41. Портативный программируемый толщиномер покрытий

- малое энергопотребление;
- хорошая повторяемость результатов;
- возможность статистической обработки информации (среднее значение показаний, среднеквадратическое отклонение, минимальное и максимальное значения; число измерений, номер измерения).

ВТП выполняется на ферритовом стержне диаметром 1,0 мм и включается в схему автогенератора. Рабочая частота чаще всего $f=2$ МГц. Диапазон измеряемых толщин от 5 до 1250 мкм. Приборы могут выпускаться и с другими диапазонами: от 5 до 500 мкм; от 5 мкм до 2 мм; от 5 мкм до 5 мм и т.д. Основная погрешность $(0,03x \dots 1,0)$ мкм, где x – измеряемое значение толщины покрытия.

Методика настройки толщиномеров весьма проста и сводится к калибровке приборов на образце основы (установка нуля) и на верхнем пределе (мера толщины заданной величины).

Задача измерения толщины электропроводящих слоев возникает при контроле металлических листов, лент, фольги, труб, баллонов, деталей плоской формы, а также при контроле металлических покрытий на изоляционных основаниях. Следует учитывать, что для измерения толщины металлических объектов с успехом применяют ультразвуковые толщиномеры, обладающие высокой точностью.

Так как результаты измерений вихретоковыми толщиномерами принципиально зависят от удельной электрической проводимости материала ОК, а также от зазора между ВТП и ОК, то погрешности вихретоковых толщиномеров обычно больше, чем ультразвуковых. Поэтому вихретоковые толщиномеры электропроводящих слоев оказываются конкурентоспособными при измерении малых толщин (не более 2 мм), а также в тех случаях, когда невозможен акустический контакт (через слой жидкости) преобразователя с ОК.

При измерении толщины электропроводящих слоев можно выделить два основных мешающих фактора: изменения зазора h и

удельной электрической проводимости σ . Следовательно, это более сложная задача, чем при измерении изоляционных покрытий на проводящих основаниях. Показания большинства приборов не зависят от влияния одного из мешающих факторов, обычно от изменений зазора. Эту независимость реализуют способом проекций либо фазовым способом. Для подавления влияния обоих мешающих факторов применяют двухчастотные способы с использованием амплитудно-фазовых характеристик сигналов на каждой частоте.

Вихретоковые толщиномеры наиболее широко применяются для измерения толщины электропроводящих покрытий при производстве фольгированных листов из стеклотекстолита, используемого в качестве основы печатных плат; в зеркальной промышленности при нанесении декоративных металлических покрытий на пластмассы. Особенность задачи измерения толщины тонких (до 150 мкм) электропроводящих покрытий состоит в том, что в этом случае практически невозможно разделить влияние толщины T и удельной проводимости σ на выходной сигнал ВТП и толщиномер реагирует, по существу, на изменение произведения σT . Годографы $U_{вн}(\sigma)$ и $U_{вн}(T)$, сближаясь, принимают форму полуокружности, соответствующей бесконечно тонкому слою.

1.14. Метрологическое обеспечение вихретоковых средств контроля

Погрешностью измерений называют *отклонение результатов измерений* от истинного значения измеряемой величины. Истинное значение величины заменяют действительным значением, найденным экспериментальным путем и весьма близким к истинному.

Под *разрешающей способностью* прибора понимают его способность уверенно различать два соседних значения контролируемого параметра при их сближении. Разрешающую способность дефектоскопа оценивают по наименьшему расстоянию между двумя соседними искусственными дефектами, при котором прибором регистрируются оба дефекта.

Основные метрологические параметры нормируются ГОСТ 26737–85 «Толщиномеры покрытий. Магнитные и вихретоковые. Общие технические требования»; ГОСТ 8.502–84 «Толщиномеры покрытий. Методы и средства поверки».

Точность измерений оценивают по отклонениям результатов измерений от истинных значений и называют *погрешностями измерений*. На практике абсолютной погрешностью измерения считают разность $\Delta = d_{изм} - d_{\delta}$, где $d_{изм}$ – измеренное значение величины; d_{δ} – действительное значение измеряемой величины.

В зависимости от поставленной задачи измерения и выбора классификационного признака структура погрешности измерения может быть следующей: $\Delta = \Delta_{сл} + \Delta_{сист}$, где $\Delta_{сл}$ – случайная составляющая; $\Delta_{сист}$ – системная составляющая.

К систематическим относят составляющие, которые закономерно изменяются при повторных измерениях одной и той же величины $\Delta_{см} = \Delta_{м.с} + \Delta_{и.с} + \Delta_{с.к}$, где $\Delta_{м.с}$ – методическая составляющая; $\Delta_{и.с}$ – инструментальная составляющая; $\Delta_{с.к}$ – составляющая погрешности измерения, обусловленная квантованием измеряемой величины.

К случайным относят составляющие, о появлении которых можно говорить только с какой-либо вероятностью.

Обычно погрешность средства измерения представляют как сумму основной и дополнительной погрешностей. При этом дополнительная погрешность рассматривается как составляющая погрешности средства измерения, возникающая при отклонении условий эксплуатации средств измерений от нормальных.

Вихретоковые дефектоскопы относятся к классу индикаторных, а не измерительных приборов.

Калибровка дефектоскопа проводится по стандартным образцам с искусственными дефектами, размеры которых нормируются различными стандартами (например, ASTM, API, DIN, ГОСТ и др.). Поэтому при разработке метрологического обеспечения дефектоскопов следует исходить из двух положений: процесс измерения сигнала от искусственного дефекта с заданными размерами относится к измерительной операции и в этом смысле дефектоскоп следует считать измерительным прибором. Для этого формируются каталоги сигналов (их амплитуд, фаз, зон расположения на комплексной плоскости), на основе которых строятся алгоритмы идентификации дефектов и оценки их размеров.

Стандартами ASTM, API, DIN, ГОСТ при контроле труб вихретоковыми дефектоскопами с проходными преобразователями в ка-

честве искусственного дефекта принято сквозное отверстие, диаметр которого зависит от диаметра контролируемых труб.

При использовании накладных преобразователей в качестве искусственного дефекта применяется продольная риска заданных размеров (глубина, ширина, длина). В табл. 1.1 приводятся размеры искусственной риски при контроле труб.

Таблица 1.1. Размеры продольной риски, используемой в качестве искусственного дефекта при контроле труб

Уровень контроля	Толщина стенки трубы, мм	Глубина наружной риски в процентах от толщины стенки	Ширина риски, мм
2	5...20	5, но не менее 0,3 мм	0,1...0,3, но не менее размера глубины риски
3		10	
4		12,5	

В качестве основных параметров в нормативную документацию вносятся две метрологические характеристики:

- порог чувствительности, диаметр сквозного отверстия для разных диаметров контролируемых труб;

- предел допускаемой абсолютной погрешности измерения сигнала от искусственного дефекта, определяемый как $\Delta_{\partial} = \pm(0,1x + U_{\partial\partial\partial})$, где x – измеряемое значение амплитуды сигнала от искусственного дефекта; $\Delta_{\partial\partial\partial} = \Delta_{с.и} + U_{к.у}$, где $\Delta_{с.и}$ – погрешность (в милливольтгах) средства измерения, с помощью которого измеряется амплитуда сигнала от искусственного дефекта; $U_{к.у}$ – величина младшего разряда (в милливольтгах) устройства дискретного изменения коэффициента усиления дефектоскопа.

Калибровку дефектоскопа выполняют с помощью стандартных образцов предприятия, число которых определяется диапазоном диаметров труб или прутков.

Изготовленному образцу присваивается шифр, например, ОСП-ВД-40П-СТЗ-1-98, который расшифровывается следующим образом: ОСП – образец стандартный предприятия; ВД-40П – шифр дефектоскопа; СТЗ – шифр предприятия; 1 – номер образца; 98 – год выпуска.

Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения сигнала от искусственного дефекта устанавливается проведением не менее пяти измерений. Значение предела допускаемой абсолютной погрешности в милливольтгах определяется по формуле

$\Delta_d = \lceil \Delta_c \rceil + t\sigma$, где $t = 2,0$ при доверительной вероятности 0,87; $\Delta_c = x_{cp} - x_n$; x_n – нормируемое значение сигнала от искусственного дефекта; $x_{cp} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 x_i$, x_i – измеряемое значение амплитуды сигнала; $x_n = 1500$ мВ; σ – среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности: $\sigma = \sqrt{0,22 \sum_{i=1}^5 (x_i - x_{cp})^2}$.

Чем больше влияющих на контроль факторов приходится учитывать, тем большими информационными возможностями должен обладать дефектоскоп, заключающихся в том, что число измеряемых параметров информационных сигналов должно быть не меньше числа искомых переменных. В дефектоскопии наиболее информативными являются двух- и четырехчастотные приборы. Информационные образы дефектов с учетом помех формируются на нескольких частотах в виде комплексных плоскостей напряжений. Конец вектора этих напряжений в виде точки на экране дисплея описывает сложные замкнутые траектории при движении ВТП относительно объекта контроля. Отображаются два параметра сигнала (составляющие X и Y) в зависимости от времени (или от связанных с ним пространственных координат ВТП относительно ОК). Базу данных заполняют на первом этапе образами искусственных дефектов различной формы и размеров, а затем дополняют образами естественных дефектов. Чем представительнее база данных, тем точнее идентификация естественных дефектов. Для иллюстрации методики приведем данные по форме сигналов от различных искусственных дефектов в трубках парогенераторов. Сигналы получены с помощью вихретокового дефектоскопа с внутренними ВТП.

Рассмотрим искусственные дефекты, в том числе цилиндрические и конические глухие отверстия разной глубины, сквозные отверстия, кольцевые проточки, поперечные и продольные пазы разного сечения. Сигналы ВТП при дифференциальном и абсолютном включении, полученные при его движении внутри трубы вдоль ее оси, регистрировались самописцами в комплексной плоскости XU , а также в координатах $X(t)$ и $Y(t)$, т.е. в режиме временной развертки.

На рис. 1.42 приведены примеры сигналов от дефектов различных типов в трубе из аустенитной стали диаметром 16 мм с толщи-

ной стенки 1,5 мм, полученные с помощью внутренних проходных ВТП на частоте 100 кГц при дифференциальном включении ВТП. Имея достаточно обширный каталог сигналов от дефектов, можно идентифицировать дефект и приблизительно оценить его параметры.

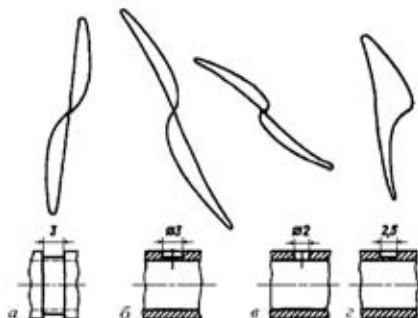


Рис. 1.42. Сигналы дефектоскопа, работающего в режимах YX , от искусственных дефектов в трубах парогенераторов: a – от кольцевой проточки глубиной 20 % толщины стенки; b – от глухого отверстия глубиной 90 % толщины стенки; c – от сквозного отверстия; d – от продольного паза глубиной 65 % толщины стенки

На рис. 1.43 в качестве примера показаны: сигнал от дефекта в виде сквозного отверстия диаметром 2 мм в трубе (a), помехи от прижимной плиты, закрепляющей трубу в парогенераторе (b), и сигнал от того же дефекта на фоне помехи (c).

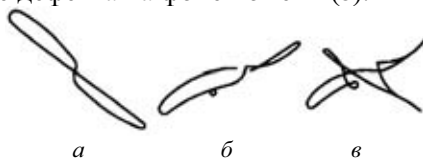


Рис. 1.43. Сигналы и помехи при дефектоскопии труб парогенераторов

Из рис. 1.43 следует, что дефект можно определить и при наличии помехи. Учитывая трудности изготовления большого числа стандартных образцов, изменение их характеристик во времени (старение), необходимость учета и хранения этих образцов, целесообразно минимизировать их число, используя настройку режима работы и поверку дефектоскопов с помощью имитаторов сигналов. Способы имитации сигналов от дефектов различны. Условно их можно разделить на физические и электрические.

Физические способы основаны на применении физической модели объекта, воздействие которой на ВТП эквивалентно воздействию дефекта. Например, для настройки и поверки порога чувстви-

тельности дефектоскопа тонкой проволоки в проходной ВТП вводят конец проволоки, диаметр которой значительно меньше диаметра проволоки, подлежащей дефектоскопии.

Электрические способы базируются на создании электрических сигналов, параметры которых близки параметрам сигналов от дефектоскопов. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы имитационные сигналы проходили как можно большую часть тракта дефектоскопа, включая и ВТП. Для этого целесообразно создавать эти сигналы на выходе генератора, возбуждающего ВТП.

Электрические способы имитации удобны в реализации, хорошо воспроизводимы и контролируются измерительной аппаратурой. Однако они не позволяют проследить за взаимодействием ВТП с ОК. Поэтому их целесообразно применять для проверки работоспособности прибора и его настройки в сочетании со стандартными образцами, содержащими искусственные дефекты.

Таблица 1.2. Стандартные образцы для калибровки электрической проводимости

Тип набора	Значение удельной проводимости, МСм/м
ГОСТ 1395–78	14...37
ГОСТ 3434–86	3...15
ГОСТ 3447–86	0,5...2

Для калибровки измерителей удельной электрической проводимости выпускаются следующие наборы стандартных образцов, приведенные в табл. 1.2.

В толщиномерах и измерителях удельной электрической проводимости (УЭП) нормируется предел допускаемой основной погрешности (мкм) $\Delta_{\delta} = (kx + l)$, где $x = 0,03$ – для толщиномеров, $k = 0,02$ – для измерителей УЭП, $l = 1$ мкм – для толщиномеров.

для толщиномеров, $k = 0,02$ – для измерителей УЭП, $l = 1$ мкм – для толщиномеров.

Часть 2

ПОДГОТОВКА ОПЕРАТОРОВ I, II УРОВНЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ

2.1. Введение

Ниже приводятся сведения, необходимые при выполнении ВТК. Предполагается, что оператор, допущенный к выполнению ВТК, имеет образование не менее среднетехнического и владеет элементарными знаниями по электротехнике. Для специалистов III уровня квалификации просмотр этой части напомнит об основных практических вопросах ВТК. В целом это упрощенное, более практическое изложение материала, соответствующее I и II уровням квалификации операторов ВТК.

2.2. Основные принципы вихрекового контроля

Около обмотки датчика создается переменное электромагнитное поле определенной величины. При приближении обмотки с током к проводящему материалу, в нем индуцируются вихревые токи.

Вихревые токи создают собственное электромагнитное поле, направление которого противоположно направлению поля обмотки. При взаимодействии этих двух полей образуется поле равновесия. Любое изменение в материале, в котором индуцированы вихревые токи, приводит к изменению результирующего электромагнитного поля.

Из законов Ома и Фарадея следует, что импеданс датчика обмотки пропорционален величине поля, создающего электродвижущую силу около нее, которое в свою очередь является функцией индуцированных вихревых токов. Следовательно, любые изменения на пути вихревых токов или местное изменение проводимости материала приведет к изменению импеданса обмотки – полного электрического сопротивления Z .

Так как взаимодействие между обмоткой и инспектируемым материалом осуществляется посредством электромагнитного поля, непосредственный контакт необязателен, т.е. между датчиком ВТК и объектом контроля может быть небольшой воздушный зазор. Но

нужно иметь в виду, что поле является функцией расстояния между обмоткой возбуждения и ОК. Любое увеличение зазора приводит к изменению величины вихревых токов и соответственно изменению импеданса обмотки (датчика).

Необходимо помнить о том, что:

- вихревые токи генерируются переменным электромагнитным полем только в электропроводящем материале;
- направление вихревых токов противоположно направлению тока обмотки, которая их индуцирует, электромагнитное поле вихревых токов противоположно направлению поля, создаваемому обмоткой возбуждения;
- вихревые токи достигают самой большой величины на поверхности изделия и уменьшаются с углублением в материал;
- по мере углубления вихревые токи сдвигаются по фазе относительно токов на поверхности.

Глубина инспектирования ограничивается скин-эффектом обычно до 4...5 мм в зависимости от свойств материала и используемых частот. Области применения ВТК многочисленны:

- выявление дефектов (трещин, вкраплений и др.);
- измерение толщины неметаллических покрытий на металлической основе;
- сортировка металлических сплавов;
- оценка качества термической обработки;
- регистрация эффектов усталости металлов.

Метод ВТК неэффективен для контроля ферромагнитных материалов из-за специфического влияния их магнитной проницаемости. Метод ВТК широко применяется для контроля цветных металлов.

На рис. 2.1. показан принцип вихретокового контроля. При ВТК по поверхности трубы протекают вихревые токи, наводимые от обмотки возбуждения вследствие электромагнитной индукции. Переменный ток синусоидальной формы пропускается через обмотку возбуждения. Это создает переменное магнитное поле, которое вызывает протекание вихревых токов в металле трубы вблизи обмотки. Вихревые токи протекают по концентрическим путям и создают общее магнитное поле, называемое *вторичным*. Комбинированием двух магнитных полей создается результирующее поле, которое посредством электромагнитной индукции создает электрическое напряжение E_1 на концах обмотки.

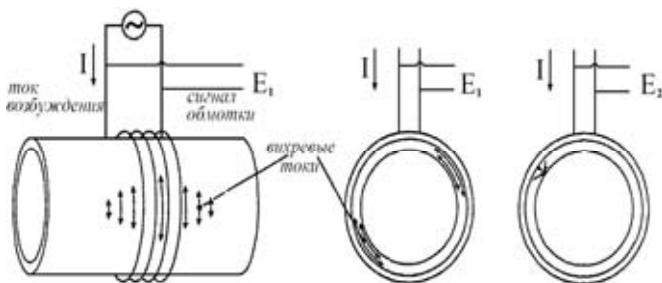


Рис. 2.1. Вихрековый контроль трубы

Если в трубе есть трещина, то направление вихревых токов через трубу меняется, что ведет к появлению нового напряжения E_2 на концах обмотки, т.е. сигнал по напряжению от обмотки зависит и от электромагнитной связи между обмоткой и материалом.

Сигнал E_2 на выходе обмотки представляет собой переменное напряжение той же частоты, что и ток, используемый для возбуждения обмотки. Он меняется в зависимости от меняющихся характеристик объекта в магнитном поле обмотки.

Так как сигнал имеет синусоидальную форму, он может быть описан амплитудой и фазой относительно возбуждающего тока. Для анализа сигнала E_2 используется электронное оборудование различной степени сложности.

При условии, что возбуждающий ток поддерживается постоянным (является постоянной среднеквадратической величиной), изменяется электрический импеданс обмотки, который равен отношению напряжения к протекающему току. Импеданс меняется с появлением дефектов, изменением свойств контролируемого объекта. Импеданс или полное электрическое сопротивление Z в значительной степени зависит от индуктивного сопротивления. Из сказанного ясно, что в электротехнике есть два основных понятия, которые важно понимать при проведении вихрекового контроля:

- 1) явление электромагнитной индукции и связанное с ним генерирование вихревых токов;
- 2) понятие импеданса рабочей обмотки и анализ измерений его в связи с состоянием объекта.

2.3. Электромагнитная индукция

При протекании тока по проводнику вокруг него создается магнитное поле со следующими характеристиками:

- сила магнитного поля H или сила намагничивания, измеряемая в амперах на метр (А/м);
- плотность магнитного потока B , индукция, измеряемая в теслах (Т).

Связь между этими двумя параметрами магнитного поля выражается зависимостью: $B = \mu H$, где μ – магнитная проницаемость, измеряемая в генри на метр (Гн/м). Принято магнитную проницаемость материала представлять в виде произведения: $\mu = \mu_r \mu_0$, где μ_r – относительная магнитная проницаемость материала – безразмерная величина; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м).

Относительная магнитная проницаемость неферромагнитных материалов приблизительно равна 1. Магнитная проницаемость материалов играет важную роль в индуцировании и распределении вихревых токов в материале. При протекании электрического тока через круговой проводник возникает магнитный поток Φ , распределение которого в пространстве показано на рис. 2.2. Магнитный поток Φ , измеряемый в веберах (Вб), является определяющим при описании взаимодействия датчика ВТК и объекта контроля.

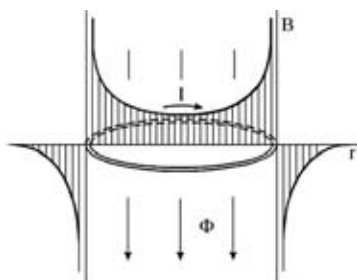


Рис. 2.2. Распределение магнитного потока около кругового витка обмотки возбуждения вне объекта контроля

Плотность магнитного потока B в определенной точке пространства зависит от силы тока в обмотке и расстояния до проводника: $B \sim I$ и $B \sim 1/r$.

Плотность магнитного потока увеличивается с увеличением силы тока и уменьшается с увеличением расстояния r до проводника. Обмотка возбуждения имеет много витков w , а ее потокосцепление равно $\Psi = W\Phi$.

При протекании переменного тока по обмотке ее самоиндуктивность L определяется как отношение потокосцепления к току, который его создает: $L = \Psi / I = W\Phi / I$.

Индуктивность определяет основную часть сопротивления электрической цепи. Единица измерения индуктивности – генри (Гн).

Закон электромагнитной индукции Фарадея гласит, что при введении проводника в переменное магнитное поле в нем индуцируется электродвижущая сила и протекает переменный ток. Если рассмотреть обмотку, помещенную в переменное магнитное поле, то индуцированная электродвижущая сила E пропорциональна изменению связанного магнитного потока обмотки во времени:

$$E = d\Psi / dt = LdI / dt = Wd\Phi / dt.$$

При введении проводящего материала в переменное магнитное поле обмотки, по которой протекает переменный электрический ток, в материале создается электродвижущая сила и токи, называемые *вихревыми*.

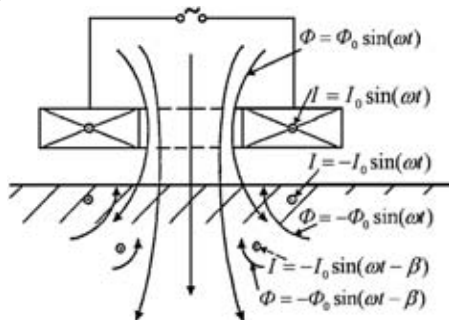


Рис. 2.3. Схема генерирования вихревых токов

Вихревые токи создают магнитное поле, которое противодействует магнитному полю возбуждения. Оба поля комбинируются и создают общее результирующее магнитное поле, т.е. общее для системы:

$$\Phi = \Phi_{\text{обм}} - \Phi_{\text{вт}}.$$

Изменение этого магнитного потока определяется характером протекания вихревых токов в проводящем материале. Любое изменение пути протекания или величины вихревых токов отразится на

их собственном магнитном поле $\Phi_{\text{вт}}$ и на общем поле системы Φ . Изменение общего поля отражается на величине напряжения в концах обмотки или на импедансе системы (полном электрическом сопротивлении).

2.4. Полное сопротивление электрической цепи (импеданс)

При протекании по цепи постоянного электрического тока согласно закону Ома сила тока равна отношению напряжения к сопротивлению: $I = U / R$.

При протекании переменного тока появляется реактивное сопротивление. Полное электрическое сопротивление больше R и обозначается Z . В этом случае закон Ома приобретает вид:

$$I = U / Z,$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

где R – активное; X_L – индуктивное; X_C – емкостное сопротивления.

Для индуктивной цепи ($X_C = 0$) величина полного сопротивления электрической цепи равна:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_C^2}.$$

Индуктивное сопротивление X_L определяется зависимостью:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L,$$

где f – частота переменного тока; L – индуктивность.

Полное сопротивление может быть записано комплексным выражением: $Z = R + jX$.

Векторное представление импеданса в комплексной плоскости дано на рис. 2.4, где по оси абсцисс отложено активное, а по оси ординат – реактивное ($X_L - X_C$) сопротивление системы.

Емкостное сопротивления X_C в цепях вихретоковых преобразователей обычно мало, т.е. $X_C \approx 0$, а активное сопротивление вихретокового преобразователя вне ОК $R \ll X_L$.

Поэтому при ВТК часто под полным сопротивлением Z подразумевается фактически индуктивное сопротивление X_L цепи преобразователя.

Из рис. 2.4 видно, что полное сопротивление (импеданс) Z может быть представлено вектором, тангенс угла θ наклона которого к оси абсцисс выражается формулой: $\operatorname{tg} \theta = \frac{X_L}{R}$.

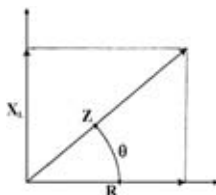


Рис. 2.4. Векторное представление импеданса в комплексной плоскости

При вихретоковом контроле множество приборов изображают сигнал в импедансной плоскости. При измерении различных параметров ВТК в импедансной плоскости получаем так называемые импедансные диаграммы или годографы. Чтобы избежать влияния параметров конкретной измерительной цепи и чтобы импедансная диаграмма приобрела обобщенный характер, используются нормализованные диаграммы, которые могут быть получены следующим образом: из активного сопротивления системы вычитается активное сопротивление обмотки датчика, так как оно не содержит информации о контролируемом объекте.

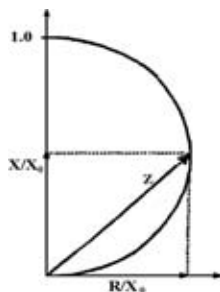


Рис. 2.5. Нормализованная импедансная диаграмма

Полученные таким образом активное и реактивное сопротивления делятся на чисто реактивное сопротивление возбуждающей обмотки $\omega L_{об}$ датчика ВТК. Как активная, так и индуктивная части импеданса после нормализования характеризуют только объект контроля (ОК).

Нормализованная импедансная диаграмма при изменении проводимости контролируемого материала показана на рис. 2.5. Таким образом как бы исключается неизменная часть сопротивления, связанная со свойствами собственно обмотки возбуждения и проводов электрической цепи.

2.5. Основные измерительные схемы

Так как при вихретоковом контроле источником информации являются незначительные изменения импеданса, в большинстве приборов вихретокового контроля используются мостовые схемы для измерения изменений небольших электрических величин. Они делятся на два больших класса – абсолютные и дифференциальные. На рис. 2.6 изображена мостовая схема измерения изменений абсолютной величины импеданса.

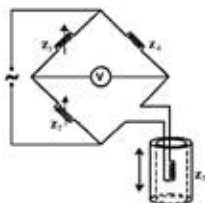


Рис. 2.6. Мостовая схема измерения импеданса – абсолютный режим

На рис. 2.7 показано подключение двух рабочих обмоток датчика к разным плечам моста, при этом разбалансирование моста определяется разницей изменений импедансов двух обмоток. Такой режим измерения называется *дифференциальным*.

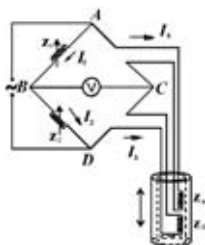


Рис. 2.7. Мостовая дифференциальная схема измерения импеданса

Дифференциальный мост находится в равновесии тогда, когда потенциалы точек B , C равны и равны падения напряжений $U_{AB} = U_{AC}$, $U_{BD} = U_{CD}$, $I_1 = I_2$, $I_3 = I_4$ и $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_4}{Z_3}$, $Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$.

Произведение импедансов двух противоположных плечей равняется произведению импедансов двух других.

2.6. Явления, происходящие в режиме измерений

При протекании вихревых токов часть ОК перематничивается (в случае ферромагнитного металла), возникают электрические потери, что приводит к увеличению активного сопротивления и соответствующих электрических потерь. Эти процессы зависят от частоты и, соответственно, массы металла, глубины проникновения магнитного потока в ОК и пр. Поэтому вводится понятие стандартной глубины проникновения.

Стандартная глубина проникновения – это расстояние до такой глубины проводящего материала, на которой вихревые токи имеют величину 36,8 % (1/e) их величины на поверхности. Стандартная глубина проникновения обозначается δ и является функцией как параметров обмотки, так и параметров контролируемого материала. Стандартная глубина проникновения может быть выражена

формулой: $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}}$, где f – частота тока обмотки, Гц, μ_0 –

магнитная проницаемость вакуума, Гн/м, μ_r – удельная магнитная проницаемость контролируемого материала; σ – удельная электрическая проводимость контролируемого материала.

Исходя из этого уравнения, можно сделать выводы, что в одних и тех же условиях:

- с уменьшением частоты глубина проникновения увеличивается;
- с уменьшением электрической проводимости материала глубина проникновения ВТ увеличивается;
- с уменьшением магнитной проницаемости материала глубина проникновения увеличивается.

Иногда в полном сопротивлении Z цепи следует учитывать температурные изменения активной его составляющей. Температура влияет на активное сопротивление. В определенном интервале

зависимость сопротивления от температуры может быть выражена формулой: $R_T = R_0(I + \alpha\Delta T)$, где R_0 – сопротивление при базовой температуре (T_0); R_T – сопротивление при температуре $T = T_0 + \Delta T$; ΔT – изменение относительно базовой температуры; α – температурный коэффициент сопротивления для каждого металла, сплава.

Для любого металла известно удельное сопротивление. Сопротивлением проводника R через удельные сопротивления ρ выражается: $R = \rho l/S$, где l – длина проводника; S – его поперечное сечение (единица измерения удельного сопротивления Ом · см).

Понятие, противоположное удельному сопротивлению, удельная проводимость: $\sigma = 1/\rho$.

Единица измерения удельной проводимости – сименс/метр (См/м).

В абсолютном режиме к одному из плечей моста подключена одна обмотка датчика. Разбалансирование измерительного моста определяется изменением импеданса этой обмотки. Если при движении расстояние между датчиком и объектом остается неизменным, импеданс остается постоянным и мостовая схема остается сбалансированной. Любое изменение свойств материала (проводимости, магнитной проницаемости, структуры), а также изменение конфигурации ОК, появление дефекта приведет к изменению вихревых токов и, следовательно, к изменению импеданса цепи. Изменение импеданса приводит к протеканию тока между двумя противоположными ветвями моста и прибор регистрирует разницу потенциалов двух ветвей, т.е. разбалансирование. По величине разбалансирования судят о качестве объекта.

В некоторых приборах ВТК ко второму плечу ветви моста подключается вторая обмотка, называемая *референтной*, которая фиксируется неподвижно близко к референтному образцу из такого же материала, что и контролируемый объект. Подключение референтной обмотки к мосту проводится с целью обеспечения опорного импеданса для облегчения балансирования.

В отличие от рассмотренного абсолютного, в дифференциальном режиме измерений импедансы одной из ветвей моста заменяются импедансами двух одинаковых обмоток, которые фиксируются неподвижно относительно друг друга и передвигаются вместе относительно контролируемого объекта, т.е. существуют две рабочие обмотки. После первоначального балансирования моста условие для

разбалансирования определяется разницей в изменении импедансов двух рабочих обмоток, поэтому режим и называется дифференциальным. В этом случае при передвижении над дефектом каждая обмотка разбалансирует мост в противоположных направлениях.

Таким образом, при абсолютном режиме измерений:

- одна рабочая обмотка подключена к одному плечу ветви моста;
- возможно подключение референтной (неподвижной) обмотки к другому плечу ветви;
- разбалансировка моста определяется изменением импеданса рабочей обмотки.

При дифференциальном режиме измерений:

- две рабочие обмотки подключены к двум плечам одной ветви измерительного моста, которые компенсируются взаимно;
- разбалансировка моста определяется разницей в изменениях импедансов двух обмоток, имеющих вторичное включение.

Абсолютный режим измерений:

- чувствителен ко всем изменениям характеристик материала;
- чувствителен как к резким, так и плавным изменениям характеристик и конфигурации контролируемого объекта;
- комбинированные сигналы (от одновременных изменений двух или более характеристик) обычно легко различимы и легко могут быть оценены;
- можно определить общую длину дефекта или зону изменения характеристики.

Дифференциальный режим обеспечивает:

- относительную амплитуду сигнала в два раза больше относительной амплитуды в абсолютном режиме;
- сигнал менее подвержен влиянию из-за неравномерного передвижения датчика, чем в абсолютном режиме;
- нечувствителен к температурным изменениям, что присуще абсолютному режиму измерений.

Дифференциальный режим измерений имеет и недостатки:

- он нечувствителен к плавным изменениям характеристик материала, возможен полный пропуск дефектов с плавной конфигурацией;
- регистрируются только края длинных дефектов;
- измеряемые сигналы могут быть очень сложными с неоднозначной трактовкой.

2.7. Факторы, влияющие на импеданс системы измерения

Знание факторов, влияющих на импеданс измерительной цепи и изображение этого влияния в комплексной плоскости, является основой анализа вихретоковых сигналов. Так как вихретоковый контроль чувствителен одновременно ко многим параметрам контролируемого материала и настройки датчика, необходимо рассмотрение влияния каждого фактора отдельно. Факторы, влияющие на импеданс и на возбуждение вихревых токов в контролируемом материале, могут быть разделены на две основные группы:

1) электротехнические свойства и геометрические формы контролируемого изделия – электропроводимость, магнитная проницаемость, толщина материала, рельеф поверхности и т.п.;

2) особенности измерительных цепей – рабочая частота, электромагнитная связь, форма обмоток.

Первая группа факторов связана с контролируемым объектом и не могут быть изменены оператором. Необходимо знать влияние каждого из этих факторов, отделить их проявление.

Со второй группой факторов оператор может работать, изменяя их под непосредственный контроль, т.е. они являются предметом выбора и настройки перед началом контроля.

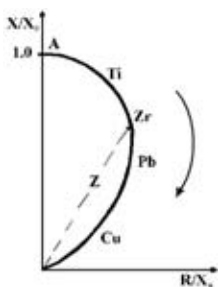


Рис. 2.8. Зависимость импеданса от изменения удельной проводимости

Рассмотрим влияние эффекта изменения удельной проводимости материала объекта на величину импеданса. На рис. 2.8 изображена нормализованная импедансная плоскость, где эффект удельной проводимости σ (удельного сопротивления ρ) показан на группе нескольких материалов (титан, цирконий, свинец, медь). Импедансная точка движется вниз по кривой с увеличением удельной проводимости.

Точка *A* соответствует импедансу обмотки в воздухе, т.е. отсутствию проводящего материала. Иногда эта кривая проводимости называется IACS-кривой, сокращенно от International Annealed Copper Standard – Международный стандарт отожженной меди.

Проводимость химически чистой отожженной меди принимается за 100 % и проводимость всех остальных материалов выражается в процентах этой проводимости.

Из рис. 2.8 следует, что уменьшение электрической проводимости σ (увеличение удельного сопротивления) увеличивает импеданс. В табл. 2.1. приведены данные о проводимости некоторых часто встречающихся материалов и сплавов, изделия из которых подвергаются вихретоковому контролю.

Таблица 2.1. Электрическая проводимость материалов при 20 °С

Материал	Удельное сопротивление ($\mu\Omega, \text{см}$)	Удельная проводимость ($\text{См/м} \cdot 10^7$)	Проводимость (% IACS)
Серебро (Ag)	1,6	6,14	105
Медь (Cu)	1,7	5,81	100
Золото (Au)	2,4	4,10	70
Алюминий (Al)	2,8	3,55	61
Цинк (Zn)	5,9	1,70	29
Адмиралтейская бронза	7,0	1,43	24
Железо (Fe)	9,7	1,03	18
Фосфорная бронза	16	0,63	11
Свинец (Pb)	20,6	0,49	8,4
Cu-Ni 70-30	37,4	0,27	4,5
Монель	48,2	0,21	3,6
Цирконий (Zr)	50	0,20	3,4
Титан (Ti)	54,8	0,18	3,1
Нержавеющая сталь	70	0,14	2,5
Циркалой-2	72	0,14	2,4
Инконель 600	98	0,10	1,7
Ti-6Al-4V	172	0,058	1,0

Нормализация по системе IACS, где за 100 %-ную проводимость принята медь, дает возможность определить, насколько изменится величина сигнала при замене материала изделия.

На величину сигнала ВТ прибора сильное влияние оказывает магнитная проницаемость. Эффект от магнитной проницаемости материала демонстрируется на рис. 2.9, где показано как изменяется импеданс при введении в измерительную катушку сердечника

немагнитного ($\mu = 1$) и слабомагнитного ($\mu = 5$). С увеличением μ импеданс увеличивается.

На рис. 2.9 изображен эффект от изменения магнитной проницаемости μ . Необходимо обратить внимание, что небольшим изменениям магнитной проницаемости материала соответствуют очень большие изменения импеданса. При анализе сигналов небольшие изменения магнитной проницаемости могут замаскировать влияние других факторов. Относительная магнитная проницаемость может изменяться значительно $1 \sim 50000$ Гн/м. Кроме того, величина $\mu \neq \text{const}$ непостоянна. Она сильно зависит от токов, наводимых при ВТК.

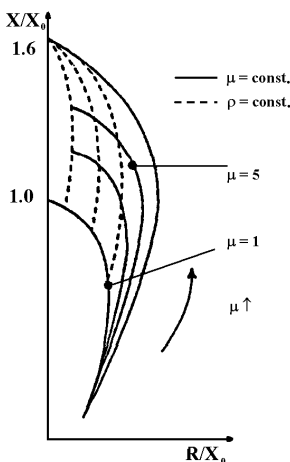


Рис. 2.9. Величина импеданса в зависимости от измерения магнитной проницаемости материала объекта

Глубина проникновения вихревых токов в неферромагнитный металл может достигать нескольких миллиметров, поэтому есть эффект от изменения толщины контролируемого материала.

На рис. 2.10 изображено передвижение импедансной точки при изменении толщины измеряемого образца от 0 до бесконечности для металлов Ti, Pb и Cu. С утончением материала сопротивление протеканию вихревых токов увеличивается и импедансная точка перемещается вверх по приведенным на рис. 2.10 кривым, что аналогично увеличению удельного сопротивления. Это говорит о том, что наличие трещин, утончение, как и повышение температуры продвигают импедансную точку вверх по кривой к величине импеданса обмотки в воздухе ($X/X_0 = 1$).

Частота переменного тока является основным внешним параметром системы, который варьируется при вихретоковом контроле для обеспечения оптимальных условий выявления и измерения дефектов.

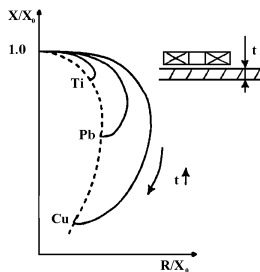


Рис. 2.10. Изменение импеданса в зависимости от толщины материала

Из рис. 2.11 видно, что при увеличении частоты импеданс уменьшается. Это происходит из-за того, что вихревые токи концентрируются в более тонком верхнем слое материала. При уменьшении рабочей частоты вихревые токи проникают глубже в материал и импедансная точка передвигается вверх по кривой (рис. 2.11,а), т.е. величина полного сопротивления цепи растет. На рис. 2.11,б построены кривые проводимости для четырех разных частот и выделены точки для титана, из которых следует, что импеданс цепи с ростом частоты убывает.

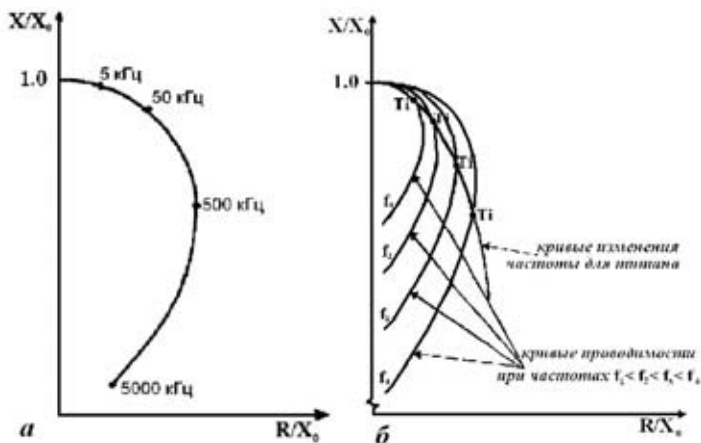


Рис. 2.11. Эффект от изменения испытательной частоты

Расстояние δ между обмоткой и контролируемым объектом определяет магнитную связь системы. Связь системы определяет ее чувствительность из-за непосредственного влияния на величину индуцированных вихревых токов. Импеданс при изменении расстояния δ от 0 до бесконечности изображен на рис. 2.12.

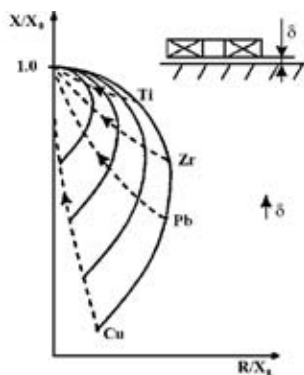


Рис. 2.12. Изменение импеданса системы от величины зазора между датчиком и контролируемой поверхностью

При небольших изменениях зазора импеданс изменяется значительно, поэтому требуется поддерживать зазор постоянным. Нестабильность зазора может поглотить результаты ВТК.

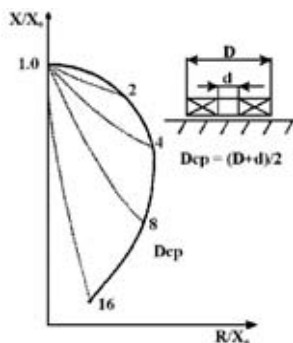


Рис. 2.13. Изменение величины импеданса от изменения диаметра катушки возбуждения

На рис. 2.13 показано эффект от изменения диаметра обмотки при сохранении постоянным числа ее витков. Увеличение среднего диаметра обмотки, перемещает импедансную точку вниз по кри-

вой, подобно повышению частоты. Таким образом, различные по своему характеру факторы иногда влияют похожим образом на величину импеданса системы ВТК. По этой причине при проведении вихретокового контроля очень важно знать и контролировать многочисленные параметры, влияющие на импеданс.

Выбор параметров контроля представляет собой сложный процесс, при котором очень важно, чтобы факторы, которые являются второстепенными, поддерживались постоянными. Только тогда можно с уверенностью сказать, что определенное изменение импеданса обусловлено изменением интересующего нас фактора, события, например, обнаружения трещины или неоднородности структуры. В идентичных условиях с увеличением частоты, с одной стороны, чувствительность системы к эффекту подъема возрастает, с другой, увеличение частоты ведет к увеличению чувствительности к небольшим поверхностным дефектам. Если требуется высокая чувствительность к небольшим поверхностным дефектам, необходимо принятие мер для уменьшения чувствительности системы к изменению зазора. Это можно сделать, например, посредством увеличения заполнения труб проходным датчиком, использования пружин, которые плотно прижимают датчик к поверхности контролируемого объекта и т.п.

2.8. Изменение фазы вихревых токов по глубине материала

Вихревые токи, индуцированные переменным магнитным полем, концентрируются вблизи поверхности материала под возбуждающей обмоткой. Глубина их проникновения уменьшается с увеличением возбуждающей частоты и является функцией удельной проводимости σ и магнитной проницаемости μ материала.

Уменьшение плотности вихревых токов в глубине материала известно как «скин-эффект» и происходит следующим образом. Вихревые токи, протекающие в контролируемом изделии, создают магнитные поля, которые противодействуют основному магнитному полю датчика.

Таким образом, основное магнитное поле датчика уменьшается по мере углубления в изделие. Вихревые токи у поверхности материала экранируют магнитное поле от датчика. Поле в глубине ослабевает и плотность индуцированных вихревых токов уменьшается.

Протекание индуцированных токов описывается уравнением:

$$\nabla^2 I = \sigma \mu \frac{\partial I}{\partial t},$$
 где I – плотность тока в материале; σ – удельная про-

водимость материала; μ – магнитная проницаемость материала; ∇^2 – дифференциальный оператор второго порядка.

Решением этого уравнения для толстого материала является:

$i_x = I_0 e^{-kx} \sin(\omega t - kx)$. Здесь i_x – мгновенное значение плотности тока на глубине x материала; I_0 – плотность тока на поверхности материала; e – основа натурального логарифма, $e = 2,71828$; x – измеряемая глубина от поверхности материала; t – время; ω – угловая частота тока, $\omega = 2\pi f$; k – характеристический параметр, $k = \sqrt{\pi f \sigma \mu}$, в котором σ – удельная проводимость материала; μ – магнитная проницаемость материала.

Иногда основное уравнение вихревых токов можно записать, используя параметр $\delta = 1/k$, называемый *стандартной глубиной проникновения*. В этом случае выражение для вихревых токов приобретает вид $i_x = I_0 e^{-x/\delta} \sin(\omega t - x/\delta)$, где x – координата по оси катушки

Вихревые токи в отношении вышеуказанных трех параметров можно обобщить следующим образом. При увеличении частоты f глубина проникновения вихревых токов уменьшается, а их фазовое отставание увеличивается. С увеличением удельной проводимости σ материала глубина δ проникновения уменьшается, а фазовое отставание увеличивается. При увеличении магнитной проницаемости μ глубина проникновения уменьшается, а фазовое отставание увеличивается.

Влияние магнитной проницаемости на вихревые токи неоднозначно, так как магнитное поле обмотки в присутствии ферромагнитного материала сильно увеличивается вопреки ослаблению поля вихревых токов.

По этой причине ферромагнитные материалы плохо подходят для вихретокового контроля. При вихретоковом контроле материалов с высокой проводимостью используется ток низкой частоты и наоборот, для материалов с низкой проводимостью используются высокие частоты. Чем ниже частоты, тем больше глубина проникновения, а фазовое отставание вихревых токов меньше.

Фазовое отставание вихревых токов в глубине играет важную роль при импедансном анализе сигналов и при анализе различных аномалий в контролируемом материале.

2.9. Суммарный вектор вихревых токов

Протекание вихревых токов в контролируемом материале подобно протеканию тока по вторичной обмотке трансформатора. Так как в этом случае вторичная обмотка представляет собой поверхность объекта, протекание вихревых токов осуществляется по замкнутому контуру конусообразного сечения. Суммарный вектор вихревых токов представляет собой интегральный вектор токов через этот конусообразный контур.

На основе уравнения для вихревых токов можно сделать следующие выводы.

1. На поверхности фаза ВТ противоположна (сдвинута на 180°) фазе тока обмотки возбуждения.

2. На глубине $x \neq 0$ плотность токов равна I_x , а фаза смещена на угол $57,3x\sqrt{\pi f \sigma \mu}$ градусов относительно фазы I_0 .

3. Вихревые токи с углублением в материал затухают по экспоненте.

4. Фаза вихревых токов сдвигается (отстает) пропорционально углублению.

Рассмотрим материал толщиной X , на котором есть два дефекта глубиной $0,3X$. При этом один из них находится на противоположной стороне объекта контроля (рис. 2.14).

На рис. 2.14 изображен суммарный вектор Σi двух частот f_1 и f_2 . Примем, что на близкой к датчику поверхности плотность ВТ i_0 и с углублением на Δx , $2\Delta x$, $3\Delta x$, ..., соответствующие плотности обозначим i_1 , i_2 , i_3 , ..., суммарный вектор выражается вектором Σi . Так как для различных частот f_1 и f_2 , амплитуда и сдвиги фаз φ_1 и φ_2 различны, то соответственно суммарные векторы различаются по амплитуде и фазе.

Фаза суммарного вектора Σi отличается от фазы вектора i_0 , т.е. суммарный вектор вихревых токов отстает от вектора тока обмотки более чем на 180° . Это показывает, что поля обмотки и вихревых токов не совсем противоположны по фазе и их взаимодействие более сложно. Также предоставляет интерес рассмотрение суммар-

ных векторов ВТ положений 2 и 3 рис. 2.14, где в определенных поперечных сечениях не генерируются вихревые токи.

Суммарные векторы $\Sigma_2 i$ и $\Sigma_3 i$ различаются и отличны от суммарного вектора $\Sigma_1 i$ бездефектного металла. Подобное рассмотрение могло бы быть сделано и для различных проводимостей материала, и полученные результаты были бы аналогичными.

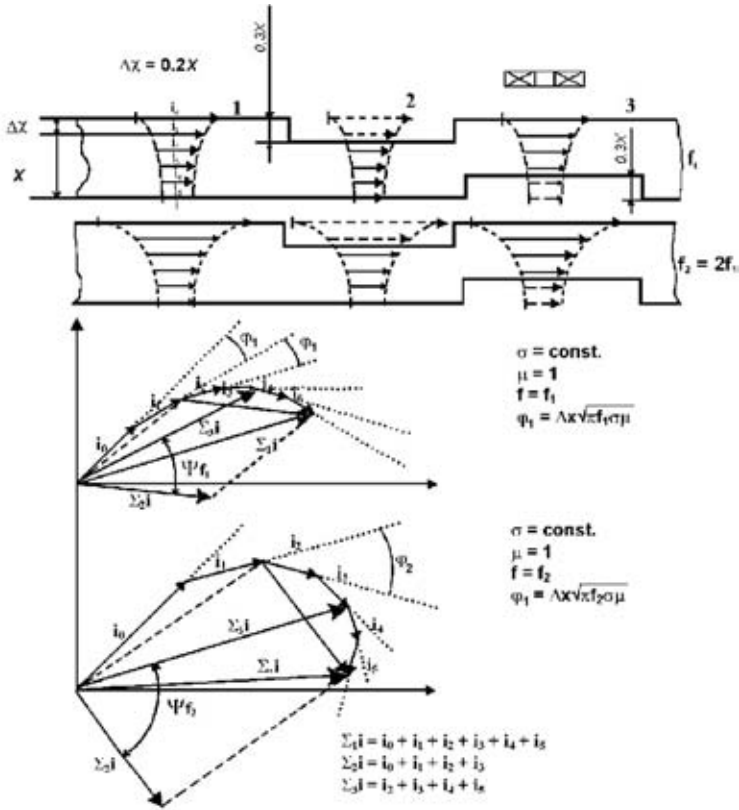


Рис. 2.14. Суммарный вектор плотности вихревых токов

Из-за сдвига фаз вихревых токов в глубине материала суммарные векторы при различных дефектах или аномалиях в материале имеют различные амплитуды и фазы, т.е. сигналы от различных аномалий будут различны.

Существует термин «разность фаз Ψ » – это разность фаз суммарных векторов вихревых токов двух дефектов. Она измеряется вихретоковыми приборами при качественной оценке сигналов в

комплексной (импедансной) плоскости. Разность сигналов двух дефектов изменяется с изменением частоты, т.е. $\Sigma i(f_1) \neq \Sigma i(f_2)$ и $\Psi(f_1) \neq \Psi(f_2)$.

Частота тока обмотки является основным параметром вихретокового контроля, так как влияет на глубину проникновения, величину суммарного вектора ВТ и разность фаз суммарных векторов двух дефектов.

2.10. Выбор рабочей частоты

Проводимость, магнитная проницаемость и форма деталей обычно фиксированы. Выбор типа датчика часто продиктован формой деталей и типом ожидаемых дефектов. Поэтому частота является единственным параметром, подбором которого могут быть достигнуты оптимальные условия для контроля. Выбор рабочей частоты зависит, в первую очередь, от характера проводимого контроля. Когда нужно измерить размеры ОК, то необходимо выбрать более высокую частоту. Например, при обследовании труб проходным зондом во время так называемой профилометрии, т.е. определение профиля трубы в различных поперечных сечениях (овальность, коррозионные язвы или другие отклонения от круговой формы). При высоких частотах относительно небольшие изменения заполнения сечения датчиком, порожденное изменением внутреннего диаметра трубы, выражается очень четким ВТ-сигналом.

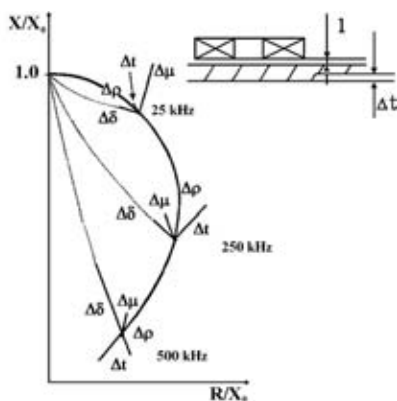


Рис. 2.15. Сигналы от изменения параметров объекта контроля при трех различных частотах 25, 250 и 500 кГц

На рис. 2.15 символами $\Delta\rho$, $\Delta\mu$ и Δt и соответствующими отрезками линий показаны направления трансформации нормализованной кривой импеданса при изменении удельного сопротивления, магнитной проницаемости и величины зазора для трех частот возбуждения 25, 250 и 500 кГц.

При необходимости измерения толщины стенки трубы (общее утончение или локальный дефект) необходима частота промежуточного диапазона, так как при такой частоте фазовая разница между сигналом от утончения (дефекта) и сигналом от движения зонда приблизительно 90° в импедансной плоскости. При большом повышении частоты эта фазовая разница приблизится к 180° , что значительно затруднит разделение сигналов. Поэтому в таких случаях предпочтительны не очень высокие частоты.

Для оценки свойств материала (проводимости или изменений магнитной проницаемости) необходимо, чтобы рабочая частота была такой, чтобы сигнал от изменения изучаемого фактора мог сдвинуться на 90° относительно базового сигнала, например, от изменения коэффициента заполнения проходного датчика. Из рис. 2.15 видно, что для контроля электрической проводимости материала подходит частота промежуточного диапазона, в то время как при контроле изменений магнитной проницаемости (ферромагнитных аномалий) необходима частота низкого диапазона.

Другой важный фактор при определении рабочей частоты – это желаемая глубина проникновения, поиск подповерхностных дефектов. Нужно помнить, что частота и глубина проникновения находятся в обратно пропорциональной зависимости, т.е. высокая частота – малая глубина проникновения, низкая частота – большая глубина проникновения (рис. 2.16).

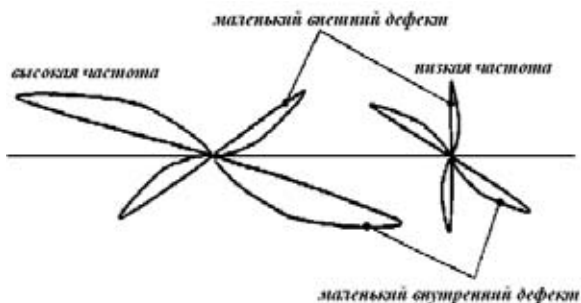


Рис. 2.16. Эталонные сигналы при двух различных частотах

Рассмотрим особенности контроля неферромагнитных труб теплообменников АЭС и выбора рабочей частоты для этой задачи. Эти трубки обычно небольшого диаметра и имеют толщину 1...1,5 мм. Вихревые токи могут проникать на такую глубину, если трубки теплообменников сделаны из неферромагнитного металла.

Выбор рабочей частоты определяется выявляемостью небольшого внутреннего и небольшого внешнего дефектов. Разница сигналов должна находиться в интервале $90...160^\circ$ импедансной плоскости. Верхняя граница изменения фазовой разницы является требованием, обусловленным стандартом и учитывается при выборе рабочей частоты. Калибровка проводится на эталонном образце.

Требования стандарта на ВТК теплообменных труб таковы, что при ориентации сигнала от 100 % дефекта на 40° , как показано на рис. 2.17, рабочая частота должна быть такой, чтобы сигнал от внешнего дефекта $4 \times 20\%$ был сдвинут на $50 - 120^\circ$ относительно фазы 40° (100 % дефекта).

Очевидно, что интервал изменения фаз сигналов велик и рабочая частота в этих условиях может варьировать в интервале $f_{50} \sim f_{120}$. При таких условиях эталонные кривые «фаза – глубина дефекта» различны, как показано на рис. 2.18.

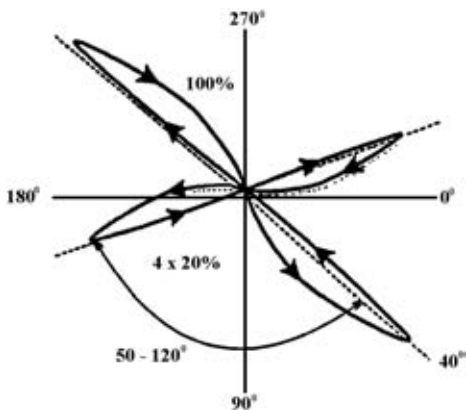


Рис. 2.17. Фазовая разница двух эталонных сигналов при оптимальной частоте

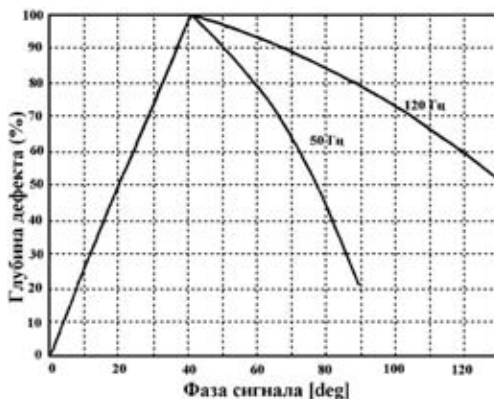


Рис. 2.18. Эталонные кривые «фаза – глубина дефекта» для двух различных частот

Эталонная кривая f_{120} более применима при оценке глубины. Однако при этой частоте сигнал от передвижения зонда будет большим, что нежелательно. При выборе более высокой частоты возрастают сигналы от небольших внешних дефектов и они могут совпасть по фазе с сигналами от геометрических изменений трубы. Поэтому выбор рабочей частоты обычно является некоторым компромиссом. При высоких частотах сигналы от ферромагнитных аномалий приблизительно совпадают по фазе с сигналами от изменения проводимости.

Для каждой комбинации – материал, геометрические размеры и измеряемая характеристика – существует оптимальная частота, при которой максимально отношение сигнал/шум.

2.11. Отношение сигнал/шум при вихретоковом контроле

При появлении одновременно двух или более факторов одновременно трудно отделить влияние измеряемого фактора от влияния фактора нежелательного.

При электромагнитном контроле любой нежелательный сигнал, который не имеет отношения к измеряемой величине, называется *шумом*. Отношение сигнал/шум можно определить как отношение амплитуды измеряемого сигнала к амплитуде шума.

Отношение сигнал/шум в вихретоковом контроле должно быть таким, что оно бы позволяло различать сигналы, соизмеримые с самыми незначительными дефектами эталонных образцов. Самым

общим требованием является требование, чтобы отношение сигнал/шум было не менее 3:1.

При фазовом анализе сигналов оптимальным отношением сигнал/шум будет тогда, когда фаза измеряемого сигнала отличается на 90° от фазы шума в комплексной плоскости.

Источниками шума при вихретоковом контроле являются:

- 1) возмущения от кабелей и электроники прибора;
- 2) собственный шум датчика;
- 3) возмущения от внешних электрических цепей и рядом работающих электротехнических устройств;
- 4) шум от неравномерности движения зонда относительно изделия;
- 5) шум от изменений в структуре материала, не имеющих отношения к измеряемому параметру;
- 6) шум от других внешних факторов.

Шум от кабелей, как и от самого зонда, является признаком плохой конструкции, выработки или эксплуатационного изнашивания. Существуют различные способы определения ухудшения сигнала в процессе длительной работы.

Это вопрос практики, критерии этого указаны в рабочих процедурах. Шум от передвижения является сигналом, который всегда присутствует в общем сигнале.

С увеличением зазора магнитная связь между датчиком и материалом ослабевает, что ведет к уменьшению плотности генерированных вихревых токов и к уменьшению амплитуды сигналов.

При движении внутри контролируемой трубы ВТП вибрирует, что ведет к получению характерного искажения сигнала. Сигнал от вибрации, колебания зазора комбинируется с сигналами от дефектов и делает их выявление трудным и ненадежным.

Коэффициент заполнения сечения трубы датчиком должен быть более 0,8 для получения качественного сигнала.

С увеличением коэффициента заполнения вибрации зонда при движении уменьшаются, что явно улучшает качество сигнала.

Использование центрирующих приспособлений, как показано на рис. 2.19, является эффективным способом повышения отношения сигнал/шум. Применяются датчики, которые плотно прижимаются к внутренней поверхности трубы при помощи пружин, при помощи постоянных магнитов и т.п.

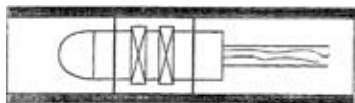


Рис. 2.19. Датчик и центрирующие приспособления для улучшения отношения сигнал/шум при ВТК теплообменных труб

Генерирование вихревых токов в материале непосредственно зависит от проводимости, локальной магнитной проницаемости и наличия дефектов в материале.

По изменению проводимости материала можно судить о качестве термической, холодной и химической обработки. ВТ-метод различает неомогенность сплавов из-за нарушений технологии производства или старения материала. Изменение проводимости определенных сплавов происходит вследствие их старения и может являться предметом контроля. Тогда сигналы от этих измерений являются полезными, а не шумом. Пример такого приложения – определение старения алюминиевых сплавов, используемых в авиации.

Изменение магнитной проницаемости контролируемого материала также является источником шума, маскирующим дефекты.

Сигналы от изменений магнитной проницаемости отличаются своим локальным характером и быстрым изменением амплитуды. При определенных частотах фаза сигналов от ферромагнитных аномалий близка фазе сигналов от дефектов и это может привести к перебраковке.

Одним из способов уменьшения влияния магнитной проницаемости на полезные сигналы является использование ВТК с насыщением. В этих зондах к переменному магнитному полю добавляется постоянное магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом в головке зонда, или путем добавления постоянной составляющей к току возбуждения обмотки. Таким образом, магнитная проницаемость материала условно поддерживается постоянной и зоны ферромагнитных аномалий инспектируются приблизительно так же, как неферромагнитный материал.

Другим способом уменьшения эффектов от изменения магнитной проницаемости является использование частоты, при которой фаза сигналов от ферромагнитных аномалий отличается на 90° от фазы интересующих нас сигналов. Этот способ не очень надежен, так как иногда фаза сигналов от ферромагнитных материалов варьируется довольно сильно.

Другими сигналами, которые вносят шум в общий сигнал при контроле труб теплообменников, являются сигналы от трубных опор и сигналы от различных отложений по внутреннему и внешнему диаметру трубы.

Эти сигналы нежелательны, они маскируют дефекты типа трещин под трубными опорами, питтинг в зонах медных отложений и межкристалльную коррозию в зонах накопления шлака. Посторонние сигналы маскируют сигнал от дефекта или деформируют их таким образом, что оценка качества затруднительна.

Самым надежным способом выявления дефектов в таких зонах является использование мультисигментного контроля, т.е. комбинирование сигналов различных частот.

Из сказанного выше можно сделать следующие выводы.

1. Каждый сигнал, в зависимости от конкретного приложения метода, может являться и шумом, и желаемым сигналом, т.е. предметом измерения.

2. Для проведения надежного вихретокового контроля минимальное отношение сигнал/шум должно быть 3:1 в отношении амплитуд сигналов.

3. При анализе сигналов в комплексной импедансной плоскости оптимальная фазовая разница между полезным сигналом и шумом 90° .

4. Методы, улучшения отношения сигнал/шум самые разнообразные и они связаны с конкретным объектом контроля.

5. Улучшение отношения сигнал/шум включает в себя выбор конструкции зонда, выбор оптимальной частоты и комбинирование сигналов различных частот.

2.12. Чувствительность и разрешающая способность

Чувствительностью системы ВТК называется ее способность регистрировать небольшие по размеру аномалии или дефекты в контролируемом объекте при соблюдении минимально требуемого отношения сигнал/шум. Минимальные изменения характеристик контролируемых материалов, которые система регистрирует при вышеуказанном условии, называется *порогом чувствительности*.

Для выявления и оценки дефектов (трещин, вкраплений, расщелений и др.) чувствительность системы ВТК настраивается по эталонным образцам. Основное требование – чтобы система четко

регистрировала сигналы даже наименьших дефектов эталонного образца.

Рассмотрим случай регистрации трещин, которые носят плоскостной характер, в отличие от большинства других дефектов, имеющих объемный характер.

На рис. 2.20 показана схема протекания вихревых токов под накладным датчиком. Токи протекают по контурам, которые являются зеркальным отражением обмотки возбуждения и расположены в плоскостях, параллельных поверхности. Характерной особенностью датчиков этого типа является нулевая чувствительность в его центре.

На рис. 2.21 показаны три случая взаимного расположения поверхностной трещины относительно обмотки. В положении 1 трещина находится под геометрическим центром обмотки, и чувствительность системы будет нулевой, так как протекание вихревых токов не изменилось относительно его же в бездефектном материале. В положении 2 вихревые токи протекают параллельно трещине.

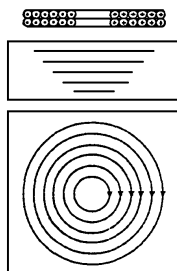


Рис. 2.20. Распределение вихревых токов под накладным датчиком

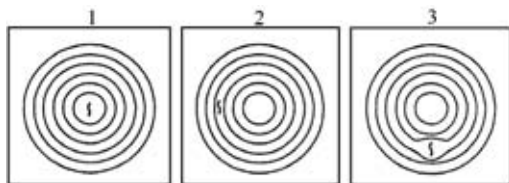


Рис. 2.21. Три случая расположения трещины под датчиком

В этом случае возмущение от протекания вихревых токов минимально и система имеет очень низкую чувствительность. В положении 3 трещина перпендикулярна направлению вихревых то-

ков. В этом случае чувствительность системы очень высокая, так как это то положение, при котором искажения вихревых токов наибольшие.

Таким образом, для гарантированного выявления трещины необходимо, чтобы в зоне сканирования дефект был перпендикулярен линиям протекания ВТ. Для этих целей иногда необходимо использование тангенциального датчика, как показано на рис. 2.22.

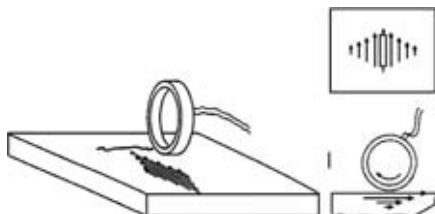


Рис. 2.22. Тангенциальный датчик ВТК

Тангенциальные датчики имеют обмотку, которая находится в плоскости, перпендикулярной поверхности контролируемого материала. Чувствительность при тангенциальном зонде самая большая тогда, когда плоскостные дефекты расположены перпендикулярно плоскости обмотки.

Часто в материале встречаются расслоения. Они также не могут быть найдены накладным зондом, как показано на рис. 2.23. Подобные дефекты могут регистрироваться датчиком в виде подковы, чье магнитное поле ориентировано иначе.

Подобным случаем, изображенному на рис. 2.23, является случай нулевой чувствительности системы для дефекта в центре прута, контролируемого внешним кольцевым зондом (рис. 2.24), и случай поперечной трещины в трубе, контролируемой стандартным проходным зондом.

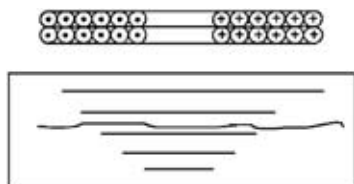


Рис. 2.23. Накладной датчик и дефект, параллельный поверхности контролируемого объекта

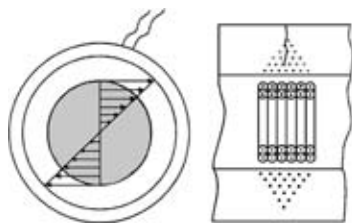


Рис. 2.24. Датчики типов «внешний кольцевой» и «проходной»

Из сказанного выше следует, что одним из факторов, определяющим чувствительность системы, является ориентация дефекта относительно направления протекания вихревых токов. Другим фактором, влияющим на чувствительность системы, являются размеры датчика относительно величины дефекта.

На рис. 2.25 показаны три случая различного отношения аксиального размера A обмотки проходного зонда к аксиальному размеру B дефекта трубы.

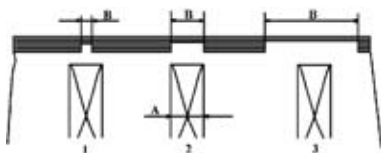


Рис. 2.25. Различные отношения осевых размеров дефектов и обмотки проходного датчика

В случае 1, $A \gg B$, изменение в протекании ВТ будет минимальным, т.е. чувствительность системы не очень высока.

В случае 2, $A \approx B$, изменение в протекании ВТ будет очень большим и чувствительность системы очень высока.

При $A \ll B$, как показано в случае 3, чувствительность системы будет высокая к краю дефекта.

Характер полученного сигнала будет отличаться от предыдущих и носить характер сигнала от повышенного зазора.

Общее правило – система имеет самую высокую чувствительность тогда, когда размеры обмотки соизмеримы с размерами дефекта.

Это правило проиллюстрировано на рис. 2.26 для случая с поверхностной трещиной и зондом плоского типа.



Рис. 2.26. Изображения различных отношений и размеров дефектов и обмотки возбуждения ВТ

При контроле дифференциальным проходным зондом влияние на чувствительность системы оказывает и аксиальное расстояние между двумя обмотками, как показано на рис. 2.27.

Оптимальная чувствительность получена при условии $C \approx B$.

Если при поиске трещин используются накладные дифференциальные датчики, то для улучшения отношения сигнал/шум необходимо большое внимание уделять ориентации обмоток относительно направления сканирования (рис. 2.28).

В случае рис. 2.28,*а* при последовательном передвижении обмоток над трещинами чувствительность системы оптимальна. В случае рис. 2.28,*б* при одновременном передвижении обмоток чувствительность системы нулевая, так как дифференциальная разница изменений импедансов двух обмоток равна 0.

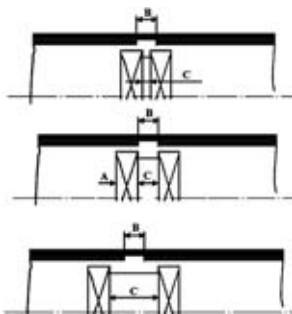


Рис. 2.27. Влияние расстояния между обмотками на чувствительность дифференциального проходного датчика

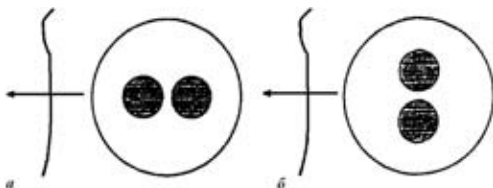


Рис. 2.28. Влияние направления сканирования на чувствительность дифференциального накладного датчика

Очевидно, что размер зонда относительно расстояния между двумя дефектами в направлении сканирования (передвижения зонда) играет ключевую роль в отношении разрешающей способности. На рис. 2.29 изображены два случая соотношения этих размеров. В случае рис. 2.29,а оба дефекта будут зарегистрированы как один, и сигнал будет деформирован. В случае рис. 2.29,б система регистрирует оба дефекта отдельно.

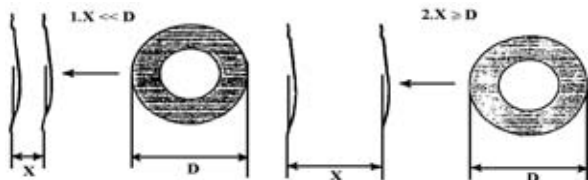


Рис. 2.29. Разрешающая способность системы

На рис. 2.30 показана регистрация продольных и поперечных трещин ротационным зондом. Так как этот датчик одинаково чувствителен к любой ориентации трещин, то обе трещины регистрируются хорошо. Ротационный датчик вращается и движется вдоль трубы. Сигналы от этих дефектов разные. Из записи сигналов следует, что продольная трещина была зафиксирована за три оборота преобразователя. Поэтому ее протяженность не менее трех шагов перемещения датчика. Характерное отличие сигналов трещин 1 и 2 позволяет классифицировать трещину 2 как поперечную.

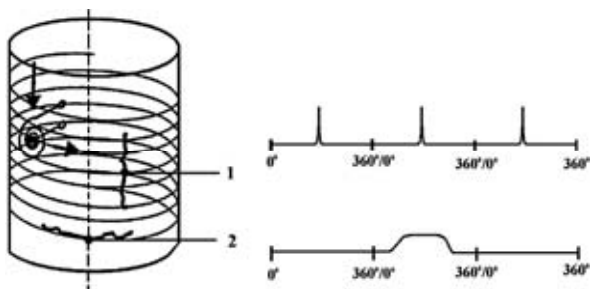


Рис. 2.30. Сигналы от ротационного зонда при продольной и поперечной ориентации трещин

Серьезная проблема возникает при отдельной индикации коротких трещин, расположенных, например, так, как показано на рис. 2.31.

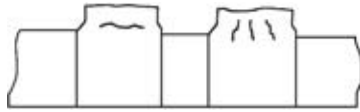


Рис. 2.31. Дефекты в зоне завальцовки труб парогенераторов

Иногда приходится использовать ротационные зонды с тремя обмотками разной ориентации, как показано на рис. 2.32.

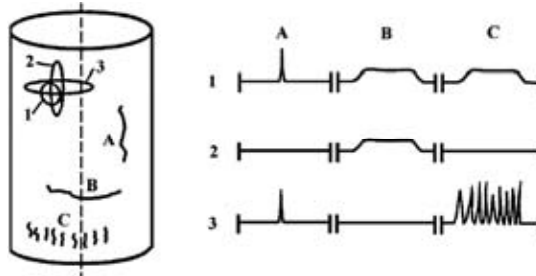


Рис. 2.32. Сигналы от ротационного зонда с тремя обмотками 1, 2, 3 при различной ориентации и расстоянии между дефектами A, B и C

Обмотка 1 – обычная поверхностная обмотка, как у обыкновенных ротационных зондов. Обмотки 2 и 3 – тангенциальные обмотки, которые ориентированы на 90° одна относительно другой. Отличие формы сигналов от трех обмоток случаев A, B и C дает возможность классифицировать дефекты A и C как продольные, а B – как поперечный.

Этот случай показывает, что разрешающая способность системы может быть повышена путем использования специальных комбинирующих обмоток с различной ориентацией витков. Таким образом:

- 1) разрешающая способность и чувствительность системы самая большая тогда, когда обмотки в направлении сканирования соизмеримы с размерами дефектов;
- 2) максимальная чувствительность тогда, когда индуцированные вихревые токи пересекаются под прямым углом;
- 3) разрешающая способность системы зависит от размера обмотки относительно расстояния между двумя соседними дефектами;
- 4) чувствительность системы может быть нулевой при определенном расположении дефекта в поле зонда и при определенной ориентации зонда относительно направления сканирования.

Это касается как теплообменных труб, так и других объектов. Современные зонды состоят из обмоток, генерирующих и регистрирующих ВТ, содержат дополнительные приспособления для движения обмоток относительно поверхности контролируемого объекта.

Различаются накладные и проходные (внешние и внутренние) зонды. Накладные используются для контроля гладких или профильных поверхностей – это плоские зонды, датчики типа «карандаш» и др. Проходные зонды делятся на два вида – внешние и внутренние. Внутренние проходные зонды используются для контроля труб, передвигаясь внутри их. Другим критерием классификации зондов ВТК является способ работы обмоток «передача–прием».

Рабочая обмотка датчика может одновременно генерировать вихревые токи и регистрирует их изменения. Такой способ применяется наиболее часто. При способе «передача – прием» необходимы как минимум две обмотки, одна из которых только возбуждает вихревые токи, а вторая только регистрирует качество объекта.

Существуют системы ВТК, при которых «передающая» и «принимающая» обмотки расположены с двух сторон объекта контроля, например, для работы с жестью или фольгой.

Характерным для ротационных зондов является то, что кроме поступательного движения они вращаются. Таким образом, передвигаясь, зонд и его обмотки описывают определенную траекторию, определяемую конфигурацией контролируемого объекта.

Существуют зонды, которые имеют повышенную индуктивность. Для этого используется сердечник из феррита. Таким образом удастся избежать пропускание большого тока через измерительную обмотку, увеличивать количество витков или увеличивать размеры датчика. Феррозондовые датчики очень компактны.

Другим способом усиления зонда является использование экранов, которые концентрируют магнитные силовые линии и направляют их в нужном направлении.

При контроле ферромагнитных изделий используются зонды с магнитным насыщением. Их обмотки находятся в постоянном магнитном поле. Это магнитное поле накладывается на переменное магнитное поле зонда и приводит ферромагнитный материал в состояние насыщения, т.е. стремятся использовать только электропроводность материала изделия. Такой же эффект может быть получен, если к переменному току обмотки добавить постоянную токовую составляющую, т.е. через обмотку датчика, кроме переменного тока, пропускать и постоянный ток.

Ясно, что конструкции реального зонда вихретокового контроля могут быть скомбинированы из указанных выше типов под конкретные специфические условия контроля конкретного объекта. Несмотря на огромное разнообразие конструкций зондов ВТК, существуют некоторые общие термины и параметры, относящиеся ко всем зондам.

Как уже было сказано, важным фактором генерирования вихревых токов и формирования сигнала зонда является поддержание постоянным зазора между обмоткой и контролируемым объектом, а также постоянство движения зонда относительно объекта контроля.

Так, в зондах накладного типа влияние зазора довольно сильно, поэтому обычно они передвигаются по поверхности, прижатые пружиной.

Рассматривая проходные датчики, говорят не о зазоре, а о коэффициенте заполнения F . Коэффициент заполнения внешних кольцевых зондов определяется как квадрат отношения внешнего диаметра трубы d к внутреннему диаметру зонда D : $F = d^2 / D^2$.

Коэффициент заполнения влияет на магнитную связь обмотки и исследуемой трубы. Магнитная связь самая сильная тогда, когда этот коэффициент равен единице. Но ясно, что на практике достичь этого невозможно. Реальная величина коэффициента заполнения находится в промежутке $1 < F < 0,8$.

Другими важными параметрами зондов являются: характерные геометрические размеры – средний диаметр обмоток, толщина, количество витков, расстояние между двумя обмотками дифференциального зонда и др.

Для того чтобы правильно выбрать ВТ-датчик необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Из какого материала контролируемая деталь?
2. Какова форма детали?
3. С каким прибором будем работать?
4. Каков характер предполагаемых дефектов?
5. Имеются ли дополнительные требования к проведению контроля?

Для каждого материала можно определить стандартную глубину проникновения вихревых токов. Она определяется проводимостью и магнитной проницаемостью материала и частотой тока обмотки. Так как характеристики материала фиксированы, т.е. на них

нельзя повлиять, параметром, подлежащим изменению, является частота.

Частота тока обмотки не может меняться произвольно, так как она является результатом одновременного удовлетворения многим условиям, результатом компромиса интересов.

Электрические характеристики обмотки, ее индуктивность должны иметь оптимальные величины в определенном диапазоне изменения рабочей частоты и определенную добротность:

$$Q = \frac{\omega L}{R}.$$

Необходимо знать возможные режимы работы прибора – абсолютный, дифференциальный или оба одновременно. Если прибор не представляет сигнал в комплексной плоскости, а вычисляет лишь амплитуду сигнала, нужно выбрать такой зонд, в котором влияние зазора сведено к минимуму.

Важно знать характер предполагаемых дефектов. Если ожидаются дефекты малых размеров, например, микротрещины, необходима катушка, обмотка которой была бы соизмерима с размерами трещин.

Ориентация дефектов в пространстве влияет на возможность их выявления, поэтому необходим датчик, чувствительный к дефектам с такой ориентацией.

Если ожидаются плавные изменения характеристик материала, то необходим абсолютный датчик, так как датчик дифференциального типа не отреагирует на плавные аномалии.

2.13. Мультичастотный вихретоковый контроль

Выбор частоты является компромиссом между определенными требованиями подавления или выявления определенных параметров. Дополнительные затруднения возникают тогда, когда необходимо детектирование и оценка сигналов, образованных в присутствии мешающих факторов, какими являются, например, сигналы от опор, отложений магнетита, меди и др.

Это обусловило разработку мультичастотного вихретокового контроля, т.е. контроля с одновременным использованием двух или более частот.

Мультичастотный метод предоставляет возможность выделить ненужные сигналы посредством параметрического комбинирова-

ния (смещения) сигналов различных частот. При мультичастотном контроле существует основная рабочая частота, которая определяется согласно ранее описанным условиям выбора.

Выбор дополнительных частот и их число определяется необходимостью исключения определенных посторонних воздействий на полезный сигнал.

Общим правилом является разделение частот на высокие, промежуточные и низкие, причем необходимо помнить, что это разделение делается относительно основной частоты, которая попадает в интервал между высокими и промежуточными частотами.

Из опыта использования мультичастотного ВТК для теплообменников можно отметить, что при высоких частотах хорошо выявляются внутренние дефекты и изменения внутреннего диаметра. На рабочей частоте и в промежуточном диапазоне частот чувствительность ко всем факторам примерно одинакова. При этом фазовая разница между внутренними, внешними дефектами и остальными сигналами выражена достаточно четко.

При низких частотах эффективны только сигналы от трубных опор и других креплений по внешнему диаметру трубы, а фазовая разница между внутренними и внешними дефектами минимальна.

Сигналы эталонного образца всех дополнительных частот калибруются так же, как и сигналы основной частоты, только низкие частоты калибруются относительно какого-либо другого сигнала. В трубах теплообменников обычно это сигнал от трубных опор.

Канал каждой частоты несет в себе специфическую информацию и используется различным образом при оценке сигналов. Канал основной частоты используется для детектирования сигналов от дефектов.

Каналы высокой и промежуточной частот используются для подтверждения или отсеивания данного сигнала. Канал низкой частоты используется для определения местонахождения трубной опоры, антивибрационной решетки и т.п.

2.14. Векторные изображения комбинирования сигналов (смещение частот)

Мультичастотный контроль является мощным средством повышения надежности вихревого контроля. Его особенность заключается в возможности параметрического комбинирования сигналов при различных частотах.

Параметрическое комбинирование дает возможность исключить нежелательные сигналы и улучшить отношения сигнал/шум. Основой параметрического комбинирования является принцип линейности при образовании сигналов, т.е. общий сигнал от дефекта и фонового шума равен линейной комбинации (векторной сумме) двух сигналов, рассматриваемых отдельно.

Эффект параметрического комбинирования противоположен изложенному выше суммированию сигналов. Необходимо из общего сигнала с посторонними воздействиями, называемыми шумом, вычесть сигнал шума, чтобы получить чистый сигнал дефекта.

Основным правилом при комбинировании является то, что для исключения N числа внешних воздействий необходимы $N + 1$ независимых информационных каналов. Соответственно, для исключения одного внешнего фактора необходимы сигналы двух различных частот.

Исключение внешних факторов основывается на различной чувствительности к двум параметрам при одной и той же частоте и различной чувствительности к одному параметру двух различных частот, как и на факте, что сигналы комбинируются линейно (т.е. они векторно аддитивны).

На рис. 2.33 показана в векторном виде чувствительность системы вихретокового контроля к сигналу от дефекта и сигнала от трубной опоры для двух различных частот f_1 и f_2 , где $f_1 > f_2$.

При более высокой частоте чувствительность к дефекту V_1 и трубной опоре V_2 приблизительно одинакова и разность фаз двух векторов φ_1 .

При более низкой частоте чувствительность к трубной опоре V_{22} очень велика, а к дефекту V_{12} – сравнительно мала. Разность фаз – φ_2 .

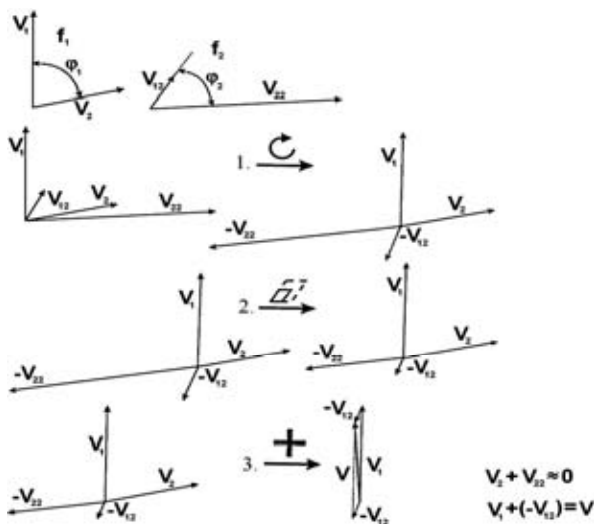


Рис. 2.33. Исключение нежелательного сигнала при смещении частот

Значки на рис. 2.33 означают: \odot – реверсирование V_{22} и V_{12} , изменение знака для вычитания; \vec{Q}_i^T – масштабирование вычитаемых V_2 и V_{12} векторов; $+$ – процедура сложения (вычитания) для получения результирующего сигнала V .

Рассмотрим процедуру исключения нежелательного сигнала от трубной опоры. При этом не надо забывать, что эта же процедура может быть применима и к сигналу от дефекта, в результате чего останется комбинированный сигнал трубной опоры. В самом общем случае двойки векторов различно ориентированы в комплексной плоскости и первым действием является ориентация векторов сигнала от трубной опоры в одном направлении, как показано на рис. 2.33, положение 1. Вторым действием является масштабирование.

Третьим действием является суммирование или вычитание сигналов в зависимости от того, одинаково ли направлены векторы V_{22} и V_2 или расположены на 180° относительно друг друга. В случае, указанном в положении 3, производим суммирование. В лучшем случае при суммировании V_{22} и V_2 получаем вектор нулевой величины, а при суммировании V_{12} и V_1 – новый вектор V , ко-

торый представляет собой комбинированный сигнал от дефекта для $f_1 - f_2$.

Четвертое действие, показанное на рис. 2.33 – ориентация вектора V в необходимом направлении. Амплитуда и фаза полученного вектора отличается от амплитуды и фазы векторов V_1 и V_2 . Сигналы нового информационного канала должны быть отдельно откалиброваны.

Рассмотренное исключение относится к одной точке импедансной плоскости. Эта же процедура для целого сигнала показана на рис. 2.34.

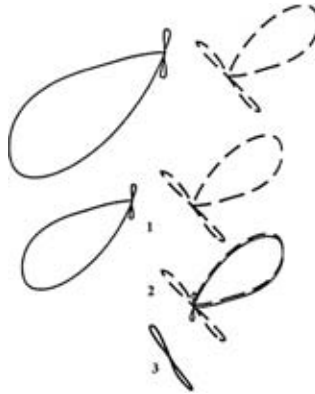


Рис. 2.34. Исключение нежелательного сигнала при смещении частот

На рис. 2.35 показана блок-схема алгоритма по исключению одного параметра при комбинировании сигналов для двух частот.



Рис. 2.35. Алгоритм исключения одного параметра

Не имеет значения, усилится ли при масштабировании один сигнал или компрессируется другой. Также не имеет значения суммирование или вычитание сигналов произойдет при условии соблюдения правильной ротации соответственного действия. Полученный сигнал может быть начальным для следующего комбинирования сигналов при другой частоте f_3 для исключения второго нежелательного фактора и т.д., как показано на рис. 2.36. Рис.2.34 и алгоритм рис. 2.35 действительны в явном виде при ручном комбинировании сигналов. Современные системы вихретокового контроля проводят комбинирование автоматически. Оператор выполняет только следующие операции:

- 1) выбор сигнала для исключения;
- 2) выбор частот смещения и их последовательность;
- 3) калибровку сигналов от полученного комбинированного сигнала.

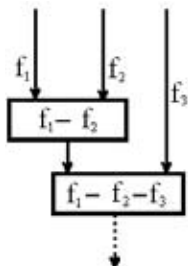


Рис. 2.36. Алгоритм исключения двух или более нежелательных сигналов

При комбинировании реальных сигналов невозможно полное исключение сигналов нежелательного фактора потому что:

- 1) обычно амплитуда и фаза варьируют в определенных границах;
- 2) при двух различных частотах форма нежелательного сигнала различна, что не может быть компенсировано масштабированием и ротацией.

Первое является причиной невозможности исключения факторов с переменными характеристиками, как, например, сигналы от ферромагнитных аномалий.

Второе требует внимательного выбора двух частот смещения, чтобы форма нежелательного сигнала была приблизительно одинакова. Это условие выполнимо при использовании близких частот. В это же время при использовании близких частот амплитуды, фазы

ней, так и от внешней поверхностей объекта, так что остаются только данные, касающиеся толщины объекта и его состояния.

Большинство вихретоковых приборов классифицируются по конечному выходу или по способу представления информации. Существуют некоторые основные требования, общие для всех типов вихретоковой аппаратуры.

Вихретоковые приборы должны осуществлять следующие функции: возбуждение, модуляцию, выделение по определенному принципу сигнала, анализ сигнала и заполнение сигнала.

На рис. 3.8 схематично представлены связи между отдельными функциональными элементами измерительных систем ВТК.



Рис. 3.8. Основные функции измерительных систем

Генератор формирует сигналы возбуждения. Модуляция сигнала происходит в электромагнитном поле блока ВТП. Затем на участке выделения сигнала обычно с помощью балансной цепи выделяется сигнал для демодуляции и анализа. На этом этапе с помощью балансных схем исключаются постоянные составляющие из сигналов переменного тока. С этой целью используются усилители и фильтры, улучшают отношения сигнал/шум и повышают уровень сигналов для последующей демодуляции и анализа.

В блок демодуляции и анализа входят детекторы, анализаторы, компараторы и фильтры. Детекторы могут быть простого амплитудного типа или синхронного типа. Блок представления сигналов – это ключевое звено между тестирующим оборудованием и теми целями, ради которых проводится тестирование. Представлять сигналы можно разными способами. Обычными средствами при этом являются электронно-лучевые трубки, осциллографы, измерительные приборы, самописцы, визуальные и звуковые индикаторы, компьютерные терминалы, устройства автоматической сигнализации и подавления. Некоторые простые вихретоковые системы показаны на рис. 3.9. На рис. 3.9,а напряжение на ВТП отслеживается с помощью вольтметра. Прибор такого типа можно использовать при больших изменениях зазоров, где не требуется особо высокая

точность. На рис. 3.9,б представлена импедансная мостовая схема. Такой прибор состоит из источника формирования сигналов возбуждения, гасящих резисторов и балансирующего моста.

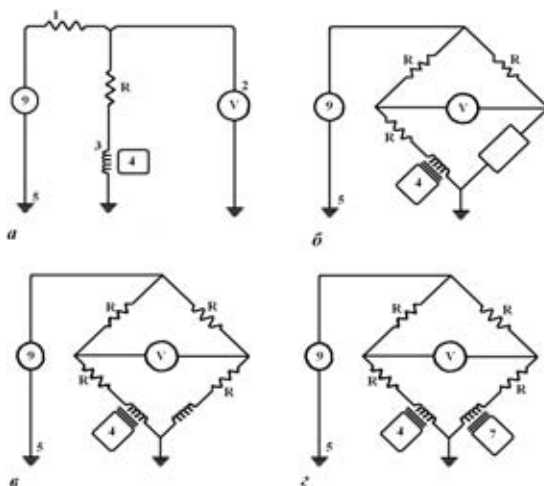


Рис. 3.9. Четыре типа простых вихретоковых приборов: 1 – резистор; 2 – вольтметр; 3 – испытательная катушка ОК; 4 – ОК; 5 – заземление; б – схемы компенсации; 7 – балластный импеданс

Прибор на рис. 3.9,в аналогичен прибору на рис. 3.9,б, но для использования балансного мостика балансирующая катушка, подобная ВТП. На рис. 3.9,г показана балансирующая катушка с эталоном δ . Такая система обычно применяется для контроля с помощью дифференциальных ВТП внешнего сравнения. Во всех этих случаях отслеживаются изменения амплитуды и фазы.

Виды вихретокового контроля можно разбить на три группы: измерение амплитуды сигнала, контроль с помощью фазового анализа и контроль с помощью модуляционного анализа. Амплитудные измерения основываются на оценке изменения модуля импеданса катушки вблизи контролируемого объекта. Контроль с помощью фазового анализа основывается на фазовых изменениях, происходящих в измерительных сигналах, и влиянии контролируемого объекта на эти фазовые изменения. Контроль с помощью модуляционного анализа связан с прохождением объекта через электромагнитное поле ВТП с постоянной скоростью. Величина частотных модуляций, наблюдаемых при прохождении дефекта через

поле ВТП, зависит от времени прохождения: чем меньше это время прохождения, тем больше частота модулирующего сигнала.

При использовании приборов, измеряющих только амплитуду сигнала, часто бывает трудно разделить сигналы, например от изменений в проводимости или магнитной проницаемости, и сигналы, обусловленные изменениями размеров. Вариантом прибора, измеряющего амплитуду сигнала, является прибор для измерения активного сопротивления. При таком контроле ВТП является частью автогенератора. Он работает как схема настройки, где частота генератора определяется индуктивным сопротивлением ВТП. Если ВТП находится под воздействием контролируемого объекта, его индуктивное сопротивление изменяется, что, в свою очередь, изменяет частоту генератора. Относительное изменение частоты $\Delta f / f$ при этом будет нести информацию о состоянии контролируемого объекта. Методы фазового анализа подразделяются в зависимости от способа представления данных на методы векторной точки, импедансной плоскости, эллипса и с линейной разверткой. На рис. 3.10 представлен метод векторной точки.

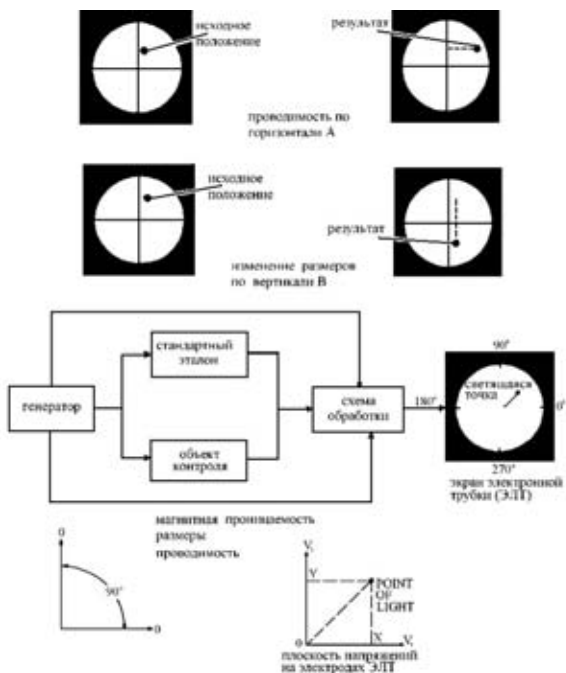


Рис. 3.10. Метод векторной точки

Представлением векторной точки является светящаяся точка на экране электронной трубки (ЭЛТ). Она соответствует векторной сумме напряжений по осям X и Y. При правильном подборе частоты и регулировке фазы напряжение V_1 выражает изменение размера, а напряжение V_2 – изменение проводимости.

Схема эллипсного метода показана на рис. 3.11.

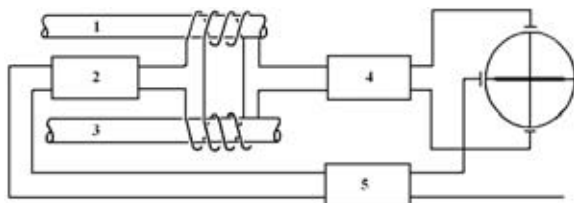


Рис. 3.11. Эллипсный метод: 1 – эталонный объект; 2 – генератор; 3 – контролируемый объект; 4 – схемы обработки; 5 – фазовращатель

Как и в методе векторной точки, здесь для обеспечения баланса напряжений на выходе прибора используется сравнение контролируемого объекта и эталонного. Сбалансированный выход представлен горизонтальной линией. Типичные реакции эллиптической системы показаны на рис. 3.12, где представлено влияние размеров и проводимости на экране ЭЛТ.

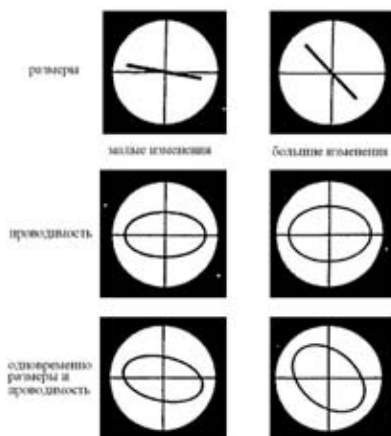


Рис. 3.12. Изображения на экране ЭЛТ при изменениях размеров, проводимости большие и малые

На вертикальные отклоняющие пластины ЭЛТ подается усиленное напряжение от вторичных обмоток ВТП. На горизонтальные отклоняющие пластины подается напряжение, соответствующее первичному току возбуждения. В такой системе эллипс образуется, когда сигнал от дефекта перпендикулярен сигналу от изменения размера в плоскости импеданса.

Метод эллипса может быть использован для измерения таких параметров контролируемого объекта, как проводимость, магнитная проницаемость, твердость, размеры и для выявления дефектов. При контроле ферромагнитных объектов с помощью методов эллипса и векторной точки может изменяться относительная магнитная проницаемость объекта из-за нелинейного намагничивания в намагничивающем поле. Такое нелинейное намагничивание приводит к появлению лишних частотных гармоник в выходных данных.

Для оценки возмущений на фоне основной частоты эффективна измерительная система, использующая метод анализа с линейной разверткой.

На рис. 3.13 показана схема измерений при использовании линейной развертки. Здесь обозначено: 1 – генератор 5 Гц, 60 Гц или 400 Гц; 2 – объект; 3 – объект для сравнения; 4 – сравнение индуктивного сопротивления; 5 – гармоники; 6 – кривая «истинно»; 7 – усилитель; 8 – основная частота; 9 – записи активных сопротивлений.

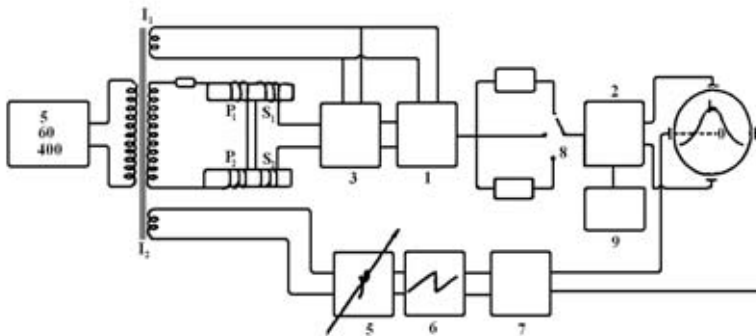


Рис. 3.13. Принципиальная схема для линейной развертки сигнала

В системе с линейной разверткой на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки подается пилообразное напряжение.

Это обеспечивает линейность прохождения электронного луча по экрану слева направо. Время прохождения луча по экрану при этом подобрано таким образом, что оно равно времени цикла тока возбуждения. Это позволяет выводить на экран один цикл синусоидального напряжения.

На рис. 3.14 схематично показан дисплей для линейной развертки.

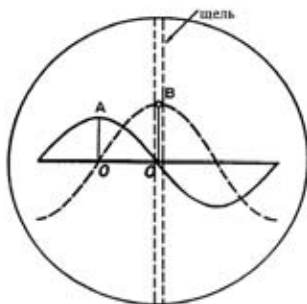


Рис. 3.14. Изображение на экране ЭЛТ

На экране ЭЛТ при линейной развертке и синусоидальных сигналах выделяется узкая зона для определения мгновенных амплитуд попадающих сюда сигналов. Базовое напряжение обычно регулируется так, чтобы «щель» пересекалась на уровне «0» В, в точке 180° синусоидальной волны.

Мгновенное значение «М» используется для анализа результатов. Оно описывается уравнением: $M = A \cdot \sin \theta$, где M – мгновенное значение; A – амплитуда измерения в «щели»; θ – угол между опорным сигналом и измеряемым сигналом.

На рис. 3.14 угловая разность A и B составляет около 90° .

Приборы для ВТК классифицируются по режиму работы. Он определяется методом возбуждения ВТП и уровнем компенсации обнуления, типом детектора.

Формы тока возбуждения могут быть такими: синусоидальная одночастотная, синусоидальная многочастотная, импульсная многочастотная, импульсная одиночная, импульсная непрерывная, качанием частоты.

Компенсация и детектирование могут выполняться в трех основных режимах:

- 1) нулевого баланса и амплитудного детектора;
- 2) нулевого баланса и амплитудно-фазового детектора;

3) заданного разбаланса и амплитудного детектора.

Режим 1 обеспечивает измерения амплитуды независимо от фазового угла. Режим 2 с амплитудно-фазовым детектором позволяет выделить сигналы, имеющие определенный фазовый угол. В такой системе на X-, Y-экране может представляться суммарный демодулированный сигнал с выделением амплитудной и фазовой зависимостей.

На рис. 3.15 показано представление информационных сигналов при испытании тонкостенной неферромагнитной трубы.

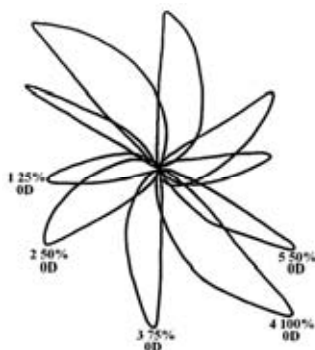


Рис. 3.15. Типичное представление стандарта для калибровки тонкостенной неферромагнитной трубы

Режим 3 позволяет создать фазово-чувствительную систему несмотря на наличие только амплитудных детекторов. Фазовая чувствительность обеспечивается за счет работы в условиях заданного разбаланса. Сигнал разбаланса при этом достаточно большой по сравнению с измеряемыми сигналами.

В этих условиях выход амплитудного детектора меняется в соответствии с изменением сигнала от контролируемого объекта на фоне значительного сигнала разбаланса. Для обеспечения наличия обеих компонент выходного сигнала ВТП требуется две «нулевые» системы.

На рис. 3.16 показана блок-схема одночастотного фазово-амплитудного прибора, использующего любую из четырех рабочих частот: 1 – генератор; 2 – регулировка фазы опорного сигнала; 3 – контролируемый объект; 4 – компенсатор; 5 – усилитель и фильтры; 6 – детектор или анализатор; 7 – дисплей или показанные пунктиром какие-либо другие индикаторы.

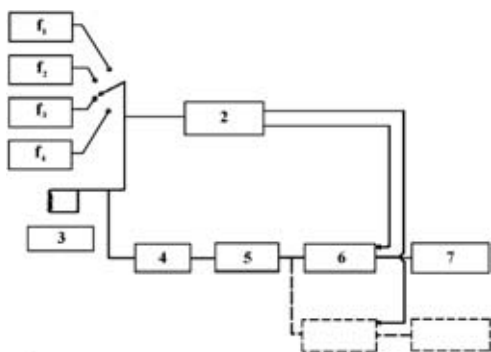


Рис. 3.16. Схема прибора для использования четырех частот

Представленная схема может работать на любой из четырех рабочих частот. Если четыре частоты занимают широкий частотный диапазон, то для работы на всех частотах может понадобиться несколько различных обмоток ВТП. Современные многочастотные приборы используют именно такой принцип; однако вместо четырех отдельных генераторов обычно применяется один генератор переменной частоты с широким рабочим диапазоном. Типичный частотный диапазон таких приборов – от 100 Гц до нескольких мегагерц.

На рис. 3.17 показана блок-схема многочастотного прибора, работающего на трех частотах одновременно: 1 – генератор; 2 – контролируемый объект; 3 – компенсационные или балансные схемы; 4 – фильтры и усилители; 5 – амплитудно-фазовые детекторы; 6 – анализаторы; 7 – считывающие устройства.

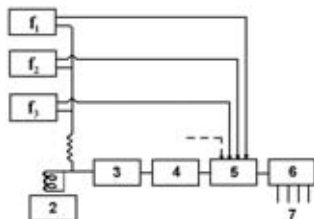


Рис. 3.17. Многочастотный прибор, работающий на трех частотах

К приборам с микропроцессорами можно подключать несколько ВТП на различных частотах. Такой прибор автоматически подавляет влияние мешающих факторов и подключается непосредственно к компьютерам для обработки больших объемов информации. Систе-

ма с импульсным возбуждением показана на рис. 3.18: 1 – генератор импульсов; 2 – контролируемый объект; 3 – компенсаторы; 4 – усилители; 5 – анализаторы; 6 – индикаторы.

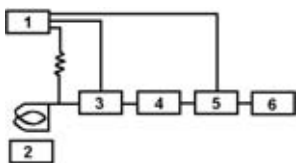


Рис. 3.18. Схема импульсного возбуждения

Импульсы воздействуют на ВТП, выходные сигналы которого компенсируются и анализируются соответствующими схемами. Системы, снабженные анализаторами, с одной или двумя точками снятия показаний действуют подобно одночастотному тестеру, использующему синусоидальное возбуждение.

Импульсные системы на вихревые токи, имеющие много точек снятия показаний, напоминают многочастотные тестеры, устройство которых показано на рис. 3.17.

Часто при контроле изделие перемещается. При этом скорость выбирается с учетом быстродействия прибора и системы отбраковки и имеет важное значение для контроля. В автоматизированных системах обычно используются дефектоотметки устройства и автоматической сортировки, а также при необходимости вращающиеся ВТП. Скорость вращения ВТП должна быть выбрана с учетом быстродействия прибора и скорости перемещения объекта.

Небольшие объекты часто пропускаются через ВТП под действием силы тяжести. Для малых объектов загрузка, контроль и выгрузка вообще представляют сложные проблемы. При прохождении проводящего объекта через обмотки возникает так называемый эффект скорости.

При прохождении объекта через магнитное поле обмотки в нем возникает дополнительная индуцированная ЭДС, которая имеет ту же частоту, что и ток возбуждения; она вызывает соответствующий ток и связанное с ним магнитное поле, порождающее сигнал, пропорциональный скорости движения объекта через ВТП.

Для более крупных и неподвижных объектов используются накладные ВТП, перемещаемые у поверхности объекта вручную или автоматически.

При этом учитываются те же аспекты, что и для труб и стержней: быстродействие прибора, быстродействие систем маркировки или сортировки, требуемая степень перекрытия зон контроля.

При обследовании крупных теплообменников используются специальные устройства для позиционирования ВТП. Трубы, подлежащие контролю, идентифицируются с помощью ручных шаблонов и их координаты заносятся в компьютерную память.

В таких системах с компьютерным позиционированием обеспечивается положительная обратная связь с помощью кодирования. В системах с ручным перемещением конец трубы определяется с помощью телекамеры.

Результаты контроля с помощью вихревых токов могут представляться в различных формах. Тип дисплея или устройства индикации определяется требованиями контроля.

Для записи результатов контроля требуется память на больших «ин-сервисных» компонентах, чтобы можно было отслеживать и запоминать коррозионные поражения и изменения интенсивности появления дефектов.

Для некоторых случаев производственного контроля необходим только простой индикатор «годен/не годен».

Цифровые дисплеи и цифровые индикаторы обеспечивают тот же вид информации, что и аналоговые измерительные устройства, но с некоторой потерей информации. Многие измерительные вихретоковые приборы имеют аналоговые выходные цепи.

Чтобы перевести аналоговые данные в цифровую форму, требуется специальная обработка информации с использованием аналого-цифровых преобразователей.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует аналоговый сигнал в цифровые значения. Имея информацию в цифровом виде, используют алгоритмы и компьютерную обработку. Особенно это важно для многоканальных, многочастотных автоматических систем ВТК.

В качестве примера приведем многоканальную четырехчастотную систему Eagle для внутритрубного контроля фирмы Tes Tex, Inc (США).

Система Eagle ф. Tes Tex (рис. 3.19) предназначена для контроля стальных труб теплообменников. Она позволяет находить и оценивать сплошную и точечную коррозию, эрозию, питтинги, трещины, механический износ и обеспечивает полную количественную оценку дефектов, выраженную в остаточной толщине стенки.

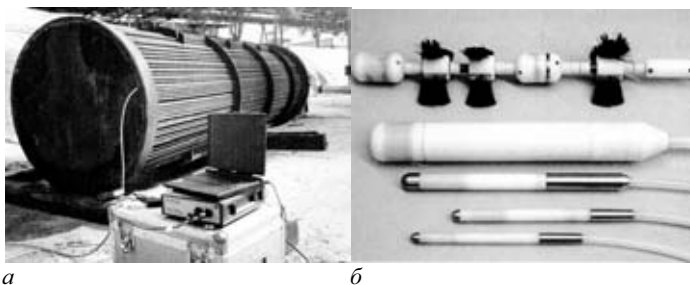


Рис. 3.19. Система вихретокового контроля Tes Tex:
а – теплообменник и система Tes Tex; *б* – преобразователи

Технические характеристики вихретоковой системы Eagle

Источник питания	переменный ток от 85 до 265 В, 50/60 Гц или от 12 В аккумуляторной батареи
Габаритные размеры	292×89×330 мм
Масса	2,3 кг
Частота опросов	150 опросов в секунду на каждый канал
Напряжение на преобразователе	до 9 В
Длина соединительного кабеля	до 45 м – стандартный кабель более 45 м – с использованием предусилителя
Скорость сканирования	0,1...0,3 м/с
Чувствительность	выявляются утонения стенок на 5 % и более обнаруживает точечную коррозию глубиной 30 % в трубе толщиной 6 мм
Количество частот	до четырех
Количество каналов	до шестнадцати
Режимы	абсолютный и дифференциальный для каждой частоты
Диапазон частот	1 кГц...1,2 МГц
Частота сбора данных	до 12000 выборок в секунду на канал
Электропитание	110/220 В переменного тока или 12 В аккумуляторной батареи
Потребляемая мощность	60 Вт
Производительность	2200 труб длиной 10 м за 12 часов

Система Eagle позволяет контролировать магнитные и немагнитные, ребристые и гладкие, прямые и изогнутые трубы из таких материалов, как углеродистая и нержавеющая сталь, никель, хромомолибденовая сталь, медь, латунь. Длина соединительного кабеля может

достигать 45 м. Производительность контроля достигает 300...500 труб за 10 часов. Система обеспечивает трехмерное цветное изображение, возможность увеличения, вращения и обработки изображения для выявления дефектов; широкий выбор типоразмеров преобразователей как прямых жестких, так и гибких; точность, сопоставимую с ультразвуковым методом.

При этом автоматически определяется тип и глубина дефекта (после предварительной калибровки).

Состав системы:

- электронный блок;
- преобразователи диаметром от 6 мм до 50 мм;
- программное обеспечение для сбора и анализа данных, сохранения файлов с данными контроля, файлов настроек;
- образцы для калибровки и настройки (рис. 3.20);
- устройство перемещения PD-6К

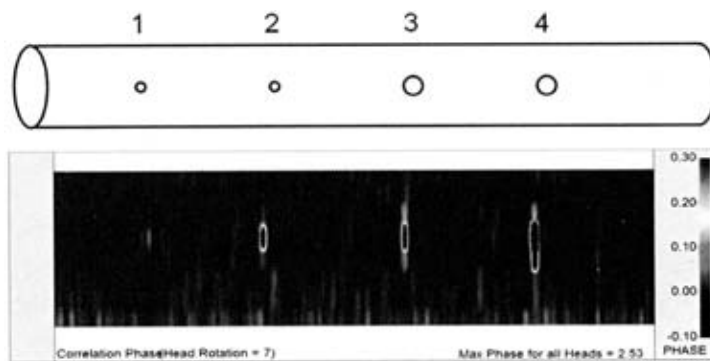


Рис. 3.20. Настраечный образец Tes Tex в виде ферромагнитной трубы диаметром 25 мм, толщиной 2 мм с 4 засверловками:

- 1 – диаметром 3 мм, глубиной 30 %
- 2 – диаметром 3 мм, глубиной 50 %
- 3 – диаметром 6 мм, глубиной 30 %
- 4 – диаметром 6 мм, глубиной 50 %

Система Eagle снабжена программным модулем для автоматического анализа данных TX-Solution. Программа TX-Solution предназначена для автоматического анализа данных контроля, полученных с использованием Eagle и печатания результатов ВТК (рис. 3.21).

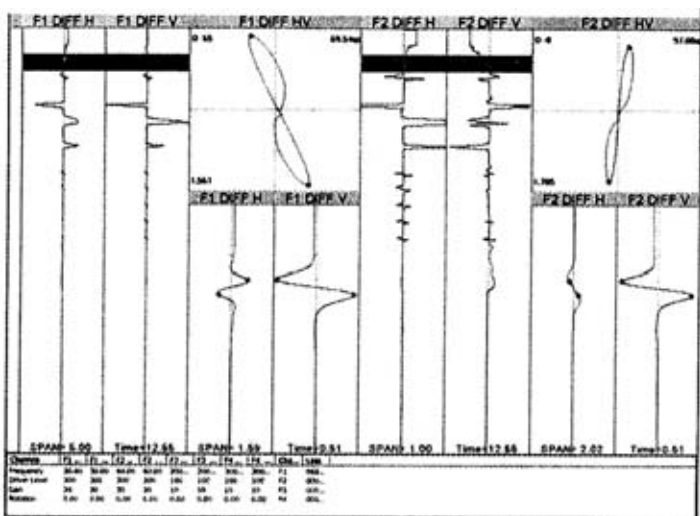


Рис. 3.21. Представление результатов ВТК по 16 каналам системы Eagle с информацией о дефектах глубиной порядка 20 % толщины

Время, необходимое для анализа данных:

- 1 трубка – менее 1 сек.;
- 1000 трубок – менее 20 мин.;
- автоматическое определение типа и глубины дефекта;
- определение расположения конструктивных элементов (перегородок) в теплообменниках;
- сортировка сигналов по глубине дефектов.

Контрольные вопросы

1. Возбуждение вихревых токов базируется на принципах:
 - а) теории волноводов;
 - б) электромагнитной индукции;
 - в) магнитострикционных сил;
 - г) всех указанных выше.
2. Вторичное поле генерируется контролируемым объектом и:
 - а) равно по величине и противоположно по направлению первичному полю;
 - б) противоположно первичному полю, но намного слабее его;
 - в) возникает в плоскости обмотка;
 - г) находится в фазе с первичным полем.
3. Если в первичную обмотку помещается неферромагнитное тело, то напряжение на обмотке:
 - а) увеличивается;
 - б) остается неизменным;
 - в) уменьшается;
 - г) смещается по фазе на 90° .
4. Если E_T создавалось контролируемым объектом из нержавеющей стали, что произойдет, если заменить его на медный?
 - а) E_T уменьшится и будет расположено под другим углом;
 - б) E_T увеличится и будет под другим углом;
 - в) изменений не будет, поскольку оба материала не являются ферромагнетиками;
 - г) ничего из указанного выше не произойдет.
5. Открытие электромагнитной индукции принадлежит:
 - а) Араго;
 - б) Эрстеду;
 - в) Максвеллу;
 - г) Фарадею.
6. Глубиной проникновения называется уровень в контролируемом объекте, на которой относительная плотность тока уменьшается до:
 - а) 25 %;
 - б) 37 %;
 - в) 50 %;
 - г) 100 %.

7. Если в объекте толщиной 3 мм глубина проникновения соответствует глубине 1 мм, то какова относительная плотность тока на внутренней поверхности?

- а) 3;
- б) менее 0,1;
- в) 1/3;
- г) нельзя определить.

8. Для данных предыдущего вопроса определить, каков будет сдвиг фаз между вихревыми токами на наружной и внутренней поверхностях объекта?

а) токи на внутренней поверхности «опережают» токи на наружной на 57°;

б) токи на внутренней поверхности «опережают» токи на наружной на 171°;

в) токи на внутренней поверхности отстают от токов на наружной на 171°;

г) токи на внутренней поверхности отстают от токов на наружной на 57°.

9. Вычислить глубину проникновения для меди на частоте 10кГц; $\sigma = 5,7 \times 10^7$ См/м:

- а) 0,1 мм;
- б) 0,02 мм;
- в) 0,66 мм;
- г) 66 мм.

10. Дифференциальное включение ВТП обычно используется во:

- а) внутренних ВТП;
- б) накладных ВТП;
- в) проходных ВТП;
- г) во всех названных ВТП.

11. ВТП «с прохождением через» – это:

а) ВТП с первичной и вторичной обмотками, соединенными так, что сигнал подается через первичную обмотку на вторичную;

- б) проходной ВТП;
- в) внутренний ВТП;
- г) б) и в) вместе.

12. Какое утверждение будет ложным при проверке трубообразных изделий с помощью проходного ВТП?

- а) могут обнаруживаться дефекты по внешнему диаметру;
- б) могут отмечаться места аксиальных дефектов;
- в) могут отмечаться места дефектов в пределах окружности;

г) могут обнаруживаться дефекты по внутреннему диаметру.

13. Измерения с помощью абсолютных ВТП осуществляются:

а) путем сравнения одного места контролируемого объекта с другим;

б) без эталонных изменений;

в) только с помощью накладных ВТП;

г) путем сравнительных измерений с использованием эталона.

14. Когда катушки в дифференциальной системе одновременно испытывают воздействие со стороны переменных одного и того же контролируемого объекта, выходной сигнал:

а) прямо пропорционален числу переменных;

б) равен нулю или близок к нулю;

в) обратно пропорционален числу переменных;

г) в основном зависит от тока возбуждения.

15. В каком типе ВТП ослаблено влияние температуры?

а) во внутреннем ВТП;

б) в абсолютном ВТП;

в) в проходном ВТП;

г) в дифференциальном ВТП.

16. Комбинированный ВТП состоит из двух или более обмоток.

Эти обмотки:

а) должны быть ориентированы компланарно по отношению к оси возбуждения;

б) могут различаться размерами;

в) должны иметь близкие по значению импедансы;

г) очень чувствительны к температуре.

17. Выбор конструкции ВТП определяется:

а) формой контролируемого объекта;

б) необходимой разрешающей способностью;

в) стабильностью;

г) всеми указанными факторами.

18. Сопротивление обмотки определяется:

а) материалом, из которого изготовлен провод;

б) длиной провода;

в) поперечным сечением провода;

г) всеми указанными факторами.

19. Индуктивность аналогична:

а) силе;

б) объему;

в) инерции;

г) скорости.

20. Единицей индуктивности является:

а) генри;

б) максвелл;

в) Ом;

г) фарада.

21. Индуктивность многослойной обмотки с воздушным сердечником с размерами $h = 0,2$; $r = 0,5$; $b = 0,1$; $w = 20$:

а) 1,38 Гн;

б) 13,8 мкГн;

в) 13,8 Ом;

г) 1,38 Ом.

22. Индуктивное сопротивление обмотки, описанной в вопросе 21, при 400 кГц равно:

а) 1380 Ом;

б) 5520 Ом;

в) 34,66 Ом;

г) 3466 Ом.

23. Импеданс обмотки с индуктивностью 100 мкГн и активным сопротивлением 20 Ом при частоте 100 кГц равен:

а) 62,8 Ом;

б) 434,8 Ом;

в) 628 Ом;

г) 65,9 Ом.

24. Q , или качество обмотки это отношение:

а) $\frac{Z}{X_L}$;

б) $\frac{X_L}{Z}$;

в) $\frac{X_L}{R}$;

г) $\frac{R}{X_L}$.

25. Введение магнитного экранирования:

а) улучшает разрешающую способность;

б) уменьшает распространение поля;

в) увеличивает импеданс;

- г) вызывает все три указанные эффекта.
26. Цель введения обмотки намагничивания в ВТП:
- а) уменьшать влияние магнитной проницаемости;
 - б) обеспечивать магнитное насыщение;
 - в) обеспечивать баланс для измерительной ВТП;
 - г) а) и б) вместе.
27. При выборе ВТП важнее всего учесть:
- а) чувствительность;
 - б) разрешающую способность;
 - в) стабильность;
 - г) требования к контролю и совместимость.
28. Материалы, в которых электроны слабо связаны, называются:
- а) резисторами;
 - б) проводниками;
 - в) полупроводниками;
 - г) изоляторами.
29. 100 % IACS определяется для специального медного стержня, имеющего сопротивление:
- а) 0,01 Ом;
 - б) 100 Ом;
 - в) 0,017241 Ом;
 - г) 172,41 Ом.
30. Удельное сопротивление 13 мкОм·см эквивалентно в % IACS:
- а) 11,032;
 - б) 0,0625;
 - в) 16,52;
 - г) 13,26.
31. Фактор, влияющий на проводимость, это:
- а) температура;
 - б) твердость;
 - в) тепловая обработка;
 - г) все три указанные фактора.
32. Материалы, имеющие тенденцию концентрировать магнитные линии, называются:
- а) проводящие;
 - б) магнитные;
 - в) резистивные;
 - г) индуктивные.
33. Диамагнитные материалы имеют проницаемость:
- а) больше, чем у воздуха;

- б) меньше, чем у воздуха;
- в) больше, чем у ферромагнитных материалов;
- г) не обладают проницаемостью.

34. Если увеличение интенсивности поля приводит к очень небольшому увеличению магнитного потока в магнитном объекте или вообще не изменяют поток в нем, то этот объект:

- а) стабилизированный;
- б) сбалансированный;
- в) насыщенный;
- г) в состоянии «у магнитного порога».

35. Краевой эффект можно уменьшить путем:

- а) экранирования;
- б) выбора более низкой частоты;
- в) использования меньшей катушки;
- г) сочетанием пп. а) и в).

36. Эффект зазора в диапазоне изменений 0...10 мм больше, чем в диапазоне 80...90 мм:

- а) в 10 раз;
- б) в 2 раза;
- в) в 5 раз;
- г) в 100 раз.

37. Вычислить влияние коэффициента заполнения, если проводящей стержень 0,5 дюйма в диаметре с эффективной проницаемостью 0,4 помещен в катушку диаметром 1 дюйм, у которого напряжение без нагрузки равно 10 В. Напряжение с нагрузкой будет равно:

- а) 2 В;
- б) 4,6 В;
- в) 8,5 В;
- г) 3,2 В.

38. Расслоения легко определяются с помощью метода вихревых токов:

- а) это верно;
- б) это неверно.

39. Температурные изменения, вибрация, воздействия окружающей среды являются для ВТП входными сигналами, генерирующими:

- а) нежелательные сигналы;
- б) магнитные поля;
- в) вихревые токи;
- г) дрейф.

40. Какая частота требуется, чтобы глубина проникновения в цирконии составляла 0,1 дюйма?

- а) 19,6 кГц;
- б) 196 Гц;
- в) 3,4 кГц;
- г) 340 Гц.

41. Чтобы уменьшить влияние характеристик дальней поверхности, частота контроля:

- а) должна смешиваться;
- б) должна быть увеличена;
- в) должна быть уменьшена;
- г) изменение частоты не оказывает влияния.

42. Частота, необходимая для того, чтобы аргумент «А» функции Бесселя был равным 1, называется:

- а) оптической частотой;
- б) резонансной частотой;
- в) предельной частотой;
- г) частотой проникновения.

43. Рассчитать предельную частоту для медного стержня диаметром 1 см ($\sigma = 50,6 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$). Правильное значение предельной частоты равно:

- а) 50 кГц;
- б) 50,6 Гц;
- в) 100 Гц;
- г) 100 кГц.

44. Используя данные из предыдущего вопроса, определить отношение f / f_g , если тестовая частота равна 60 кГц:

- а) 1,2;
- б) 120;
- в) 60;
- г) 600.

45. Величина $\omega L_s G$, равная 1,4, соответствует:

- а) материалу с высоким удельным сопротивлением;
- б) материалу с высокой электропроводностью;
- в) материалу с низкой электропроводностью;
- г) непроводящему материалу.

46. Первичное активное сопротивление вычитается, потому что:

- а) активное сопротивление всегда постоянно;

б) активное сопротивление не зависит от частоты и не характеризуется ОК;

в) активное сопротивление не добавляется к импедансу;

г) ни по одной из этих причин.

47. Годографы для металлического цилиндра и тонкостенной трубки различны, потому что:

а) частоты различны;

б) проводимости различны;

в) необходимо учитывать скин-эффект;

г) данные для тонкостенной трубки не были нормированы.

48. При использовании многочастотных систем нижние дополнительные частоты используются для подавления:

а) изменения проводимости;

б) сигналов от внутренней поверхности;

в) сигналов от наружной поверхности;

г) изменений магнитной проницаемости.

49. Выделение сигнала осуществляется с помощью:

а) детекторов;

б) активных сопротивлений;

в) компенсаторов;

г) компараторов.

50. В большинстве вихретоковых приборов для возбуждения ВТП используют импульсы:

а) прямоугольной формы;

б) треугольной формы;

в) синусоидальной формы;

г) пилообразные.

51. Когда отслеживается только направление вектора напряжения на катушке, то система относится к типу систем:

а) с модулем импеданса;

б) с фазовым анализом;

в) с оценкой реактивного сопротивления;

г) с оценкой активного сопротивления.

52. В системах с оценкой реактивного сопротивления легко отличить изменения от размеров и от дефектов:

а) это верно;

б) это неверно.

53. Вихретоковые системы можно классифицировать по:

а) выходным характеристикам;

б) способу возбуждения;

- в) величине фазового сдвига;
- г) характеристикам, указанным в а) и б) совместно.

54. При модуляционном контроле контролируемый объект должен быть:

- а) стационарным;
- б) движущимся;
- в) поляризованным;
- г) насыщенным.

55. При использовании метода векторной точки нежелательны перемещения на экране:

- а) вертикальные;
- б) горизонтальные;
- в) направленные под углом 45° к горизонтали;
- г) ориентированные случайным, непредсказуемым образом.

56. При контроле стержня по методу эллипса отношение f/f_g уменьшается с 50 до 5 %. Реакция от 5 % поверхностной трещины будет выглядеть:

- а) более эллиптической;
- б) менее эллиптической;
- в) оставаться неизменной;
- г) поворачиваться на 90° по часовой стрелке.

57. Если используется линейная развертка, то форма гармоники выглядит:

- а) как фазовые сдвиги основной гармоники;
- б) как форма основной гармоники;
- в) не влияет на вид основной гармоники;
- г) как модификация пилообразных сигналов.

58. Рассчитайте мгновенное значение «М» для фазового сдвига сигналов 45° при 10 вертикальных градациях амплитуды по рис. 3.14:

- а) 14;
- б) 7;
- в) 0,7;
- г) 1,4.

59. Многочастотный прибор, в котором катушка возбуждается на нескольких частотах одновременно, построен на принципе:

- а) мультиплексирования;
- б) с разделением времени;
- в) широкополосного;
- г) синтезированного.

60. Многочастотный прибор, в котором катушка возбуждается на нескольких частотах последовательно, построен на принципе:

- а) мультиплексирования;
- б) с разделением времени;
- в) широкополосного;
- г) декартова.

61. В импульсной вихретоковой системе, использующей короткие и длинные импульсы, короткие импульсы используются для уменьшения:

- а) краевого эффекта;
- б) скин-эффекта;
- в) эффекта зазора;
- г) изменения проводимости.

62. При выборе скорости перемещения при автоматическом контроле большого числа труб и стержней учитывается главным образом:

- а) быстродействие прибора;
- б) быстродействие автоматической сортировки;
- в) эффект скорости;
- г) все указанное выше.

63. Требования к предоставленной информации определяются:

- а) назначением контроля;
- б) требованиями к записи;
- в) необходимостью автоматического контроля;
- г) всем указанным выше.

64. Амплитудные ограничители обеспечивают метод управления:

- а) пределами годности или дефектности;
- б) измерением аппаратуры;
- в) диапазоном амплитуд сигналов, воспринимаемых дисплеем;
- г) всем указанным выше.

65. Звуковые и световые индикаторы обеспечивают только:

- а) качественную информацию;
- б) количественную информацию;
- в) информацию о дефектности;
- г) информацию о годности.

66. Принцип гальванометра служит основой для исследования:

- а) коррозионных процессов;
- б) металлографического анализа;
- в) показаний вольтметра;
- г) излучения света.

67. Чтобы передать аналоговую информацию цифровому компьютеру, ее необходимо обработать с помощью:

- а) аналого-цифрового преобразователя;
- б) микропроцессора;
- в) фазового детектора;
- г) амплитудного детектора.

68. В электронно-лучевой трубке электронная пушка:

- а) направляет луч;
- б) фокусирует луч;
- в) генерирует луч;
- г) выполняет все указанное выше.

69. Фотохимические реакции, протекающие при «обстреле» электронами экрана ЭЛТ, вызывают:

- а) фотосинтез;
- б) фосфоресценцию;
- в) флуоресценцию;
- г) и фосфоресценцию и флуоресценцию.

70. Экраны с высоким послесвечением обычно используются для представления повторяющихся сигналов:

- а) это верно;
- б) это неверно.

71. Совокупность линий, формируемых при двумерной записи, называют:

- а) линиями сетки;
- б) растром;
- в) перекрестной штриховкой;
- г) представлением в развертке.

72. Электропроводность, твердость, состав относятся к группе:

- а) обнаружения дефектов;
- б) свойств или характеристик материалов;
- в) определения размеров;
- г) к специальной группе.

73. Если используется фазово-амплитудный метод проверки с применением внутреннего ВТП для обследования труб, то сигнал, появляющийся на экране электронно-лучевой трубки под углом 90° , соответствует:

- а) трещине по внутреннему диаметру;
- б) трещине по внешнему диаметру;
- в) впадине;
- г) выпуклости.

74. Дефекты в теплообменниках, там, где находятся поддерживающие кронштейны, легче определяются из-за концентрации магнитного поля в кронштейне:

- а) верно;
- б) неверно.

75. При использовании многочастотного метода на смонтированных трубах теплообменников сигналы от кронштейнов могут подавляться при добавлении к сигналу оптимальной частоты сигнала:

- а) низкой;
- б) высокой;
- в) низкой или высокой;
- г) ни той, ни другой.

76. В авиационной промышленности обычной проблемой для газотурбинных двигателей является:

- а) коррозия;
- б) усталостное растрескивание;
- в) вибрационное повреждение;
- г) эрозия.

77. Многослойные авиационные конструкции обычно проверяются с помощью:

а) приборов с непрерывной синусоидальной волной низкой частоты;

б) приборов с непрерывной синусоидальной волной высокой частоты;

в) приборов с импульсными системами;

г) а) или в).

78. Реакция на многослойную структуру с изменяющейся проводимостью следует траектории:

а) ортогональной;

б) спиральной;

в) линейной;

г) ступенчатой.

79. Электропроводность не зависит от температуры:

а) верно;

б) неверно.

80. Остаточные напряжения в контролируемой детали производят такой небольшой эффект, что обычно при выборе эталонов их игнорируют:

а) верно;

б) неверно.

Ответы на вопросы

№ вопроса	Ответ	№ вопроса	Ответ	№ вопроса	Ответ	№ вопроса	Ответ
1	Б	21	б	41	б	61	в
2	Б	22	в	42	в	62	г
3	в	23	г	43	в	63	г
4	а	24	в	44	г	64	а
5	г	25	г	45	б	65	а
6	б	26	г	46	б	66	в
7	б	27	г	47	в	67	а
8	в	28	б	48	б	68	г
9	в	29	в	49	в	69	г
10	г	30	г	50	в	70	б
11	г	31	г	51	а	71	б
12	в	32	б	52	б	72	б
13	б	33	б	53	г	73	б
14	б	34	в	54	б	74	б
15	г	35	г	55	а	75	а
16	б	36	а	56	в	76	б
17	г	37	в	57	б	77	г
18	г	38	б	58	б	78	б
19	в	39	а	59	в	79	б
20	а	40	а	60	а	80	б

ЛИТЕРАТУРА

1. *Неразрушающий* контроль: Справ. в 8 т. /Под общей ред. В.В.Клюева. /Т. 2. Кн. 2: Ю.К.Федосенко, В.Г.Герасимов, А.Д.Покровский, Ю.Я.Останин. Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.
2. *Электротехнический* справочник: в 4 т. Т. 1: Общие вопросы. Электротехнические материалы /Под общей ред. В.Г.Герасимова и др. 8-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 1995. – 420 с.
3. *Электротехника* и электроника: Учебн. для вузов. В 3 кн. Кн. 1: Электрические и магнитные цепи /В.Г.Герасимов, Э.В.Кузнецов, О.В.Николаева и др. – М.: Энергоиздат, 1996. – 380 с.
4. *Неразрушающий* контроль качества изделий электромагнитными методами /В.Г.Герасимов, Ю.Я.Останин, А.Д.Покровский и др. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.
5. *Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е.* Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 230 с.
6. *Неразрушающий* контроль. В 5 кн. Кн. 3: Электромагнитный контроль /В.Г.Герасимов, А.Д.Покровский, В.В.Сухоруков. – М.: Высш. шк., 1993. – 199 с.
7. *Неразрушающий* контроль. Россия. 1990 – 2000 гг.: Справ. /Под ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 2001. – 520 с.
8. *Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г.* Электромагнитная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с.
9. *Учанин В.Н., Цирг В.Н.* Опыт применения низкочастотных вихретоковых дефектоскопов для выявления скрытых дефектов усталостного и коррозионного происхождения //Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1989. – № 4. – С. 71 – 75.
10. *Учанин В.Н.* Вихретоковые методы выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций //Там же. – 2006. – № 2. – С. 3-12.
11. *Троицкий В.А.* Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений. – Киев: Феникс, 2009. – 275 с.
12. *Троицкий В.А.* О подготовке специалистов для сертификации по международной системе PCN //Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2008. – № 4. – С. 14 – 28.
13. *Клюев В.В.* Расчет токовихревого преобразователя для контроля движущихся объектов //Измерительная техника. – 1974. – № 1.

14. *Русскевич Ю.Н., Шкарлет Ю.М.* Импульсный электромагнитный метод измерения параметров проводящих материалов и изделий //Электромагнитные методы контроля. – М. – 1969.
15. *Патон Б.Е., Троицкий В.А.* Разработки ИЭС им.Е.О.Патона в области неразрушающего контроля сварных соединений /Тр. 7-й Междунар. конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». – Москва. – 2008. – 208 с.
16. *Учанин В.Н.* Вихретоковые мультитифференциальные преобразователи и их применение //Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2006. – № 3. – С. 34 – 41.
17. *Федосенко Ю.К.* Приближенный расчет трехмерных моделей в теории вихретоковой дефектоскопии накладными преобразователями //Дефектоскопия. – 1982. – № 9.
18. *Лазарев С.Ф., Копылов С.И.* Ортогональные ВТП для контроля угловых смещений электропроводящих изделий //Там же. – 1990. – № 9.
19. *Троицкий В.А.* Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. – Киев: Феникс. – 2006. – 300 с.
20. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. – Л.: Энергия. – 1980. – 115 с.
21. *Немцов В.М., Шамаев Ю.Н.* Справочник по расчету параметров катушек индуктивностей. – М.: Энергоиздат. – 1981. – 136 с.
22. *Учанин В.Н.* Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации //Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2010. – № 4. – С. 22 – 28.
23. *Eddy Current Characterization of Materials and Structures* – ASTM, STP 722. – 1981. – American Society to Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania.
24. *Eddy Current Nondestructive Testing* – NBS Special Publication 589. – 1981. – National Bureau of Standards Washington, D.C.
25. *Hagemaiер D.J. and Steinberg A.P.*, Low Frequency Eddy Current Inspection of Aircraft Structure. – Materials Evaluation. – Vol. 40. – No. 2. – Feb. 1982. – P. 206 – 210. American Society for Nondestructive Testing. Columbus. Ohio.
26. *MIL-STD-1537A (USAF) Electrical Conductivity Test for Measurement of Heat Treatment of Aluminum Alloys, Eddy Current Method.* – June 1981. – U.S. Department of Defense, Washington, D.C.
27. *ASNT Recommended Practice No. SNT-TC-1A (1980 Edition), Supplement E.* – 1980. – American Society for Nondestructive Testing, Columbus, Ohio.

28. *Libby H.L.*, Introduction to Electromagnetic Nondestructive. Test: Methods. – 1971. – John Wiley & Sons, Inc. – New York.
29. *ASME Boiler & Pressure Vessel Code*, Section V, XI 1980 Edition. American Society of Mechanical Engineers, New York.
30. *Cecco, V.S., G. Van Drunen and F.L. Sharp, Eddy Current Manual: Test Method*. Vol. 1, 1. AECL-7523, Chalk River, ON: Chalk River Nuclear Laboratories. – 1983.
31. *ASNT Nondestructive Testing Handbook*, Volume 4: Electromagnetic Testings, Second Edition. – 1986. – American Society for Nondestructive Testing, Columbus. Ohio.
32. *ГОСТ 27333–87*. Контроль неразрушающий. Измерение удельной электрической проводимости цветных металлов вихретоковым методом.
33. *ГОСТ 2669–85*. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы магнитные и вихретоковые. Общие технические требования.
34. *ГОСТ 26737–85*. Контроль неразрушающий. Толщиномеры покрытий магнитные и Вихретоковые. Общие технические требования.
35. *EN 473:2008*. Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала неразрушающего контроля. Основные принципы.
36. *E–309–77*. Контроль стальных трубных изделий с помощью вихревых токов с использованием магнитного насыщения.
37. *Электромагнитный (вихревых токов) контроль бесшовных и сварных трубных изделий, аустенитная нержавеющая сталь и аналогичные сплавы*.
38. *E–243–80*. Электромагнитный (вихревых токов) контроль бесшовных труб из меди и медных сплавов.
39. *E–566–82*. Электромагнитная (вихревые токи) сортировка черных металлов.
40. *E–215–79*. Электромагнитный контроль бесшовных труб из алюминиевых сплавов.
41. *E–376–79*. Электромагнитный (вихревых токов) контроль немагнитных труб теплообменников.
42. *E–376–79*. Измерение толщины покрытий с помощью электромагнитных методов контроля: магнитного поля и вихревых токов.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Часть 1. Теоретические основы вихретокового метода	5
1.1. Переменный синусоидальный ток и его представление в комплексном виде	5
1.2. Векторные диаграммы синусоидальных токов и напряжений	8
1.3. Закон электромагнитной индукции. Собственная и взаимная индуктивность	10
1.4. Активное, реактивное и полное сопротивление	16
1.5. Вихревые токи и поверхностный эффект в проводящих изделиях	21
1.6. Накладные вихретоковые преобразователи	28
1.7. Контроль электропроводящих изделий большой толщины	30
1.8. Контроль толщины диэлектрических покрытий	35
1.9. Контроль листов накладными вихретоковыми преобразователями	36
1.10. Спектральные составляющие сигналов ВТП	37
1.11. Дефектоскопия накладными ВТП	40
1.12. Требования, предъявляемые к вихретоковым дефектоскопам универсального типа	43
1.13. Вихретоковые толщиномеры	47
1.14. Метрологическое обеспечение вихретоковых средств контроля	50
Часть 2. Подготовка операторов I, II уровней квалифика- ции.....	56
2.1. Введение	56
2.2. Основные принципы вихретокового контроля	56
2.3. Электромагнитная индукция	59
2.4. Полное сопротивление электрической цепи (импеданс)	61
2.5. Основные измерительные схемы	63
2.6. Явления, происходящие в режиме измерений	64
2.7. Факторы, влияющие на импеданс системы измерения	67
2.8. Изменение фазы вихревых токов по глубине материала	72
2.9. Суммарный вектор вихревых токов	74
2.10. Выбор рабочей частоты	76
2.11. Отношение сигнал/шум при вихретоковом	

	контроле	79
2.12.	Чувствительность и разрешающая способность	82
2.13.	Мультичастотный вихретоковый контроль	91
2.14.	Векторные изображения комбинирования сигналов (смещение частот)	92
Часть 3. Подготовка специалистов III уровня квалификации		98
3.1.	Введение	98
3.2.	Расчет глубины проникновения вихревых токов	98
3.3.	Некоторые особенности ВТП	102
3.4.	Представление параметров контроля в относительных единицах	106
3.5.	Выбор технологических параметров контроля	110
3.6.	Особенности многочастотных измерительных систем	115
	Контрольные вопросы	130
	Ответы на вопросы	142
Литература		143

Наукове видання

Троїцький Володимир Олександрович

Вихорострумний контроль

Підписано до друку 00.00.2011 р.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 8,60.
Обл.-вид. арк. 8,48. Папір офс. Друк офс.
Наклад 300 прим. Зам. 11-329.

Віддруковано в друкарні «Видавництво «Фенікс».
Св-во об'єкта видавничої справи
ДК № 271 від 07.12.2000 р.
03680, м. Київ, вул. Шутова, 13-Б.
www.kniga.kiev.ua