

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ АППАРАТЫ И СИСТЕМЫ

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки  
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»  
дневной формы обучения*



Могилев 2018

УДК 620.3:620.179.14  
ББК 31.22  
Э 45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «5» октября 2018 г.,  
протокол № 3

Составитель д-р техн. наук, проф. В. А. Новиков

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Приведены задания для практических занятий по дисциплине «Электромагнитные аппараты и системы», методические рекомендации по их выполнению, используемая литература.

Учебно-методическое издание

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ АППАРАТЫ И СИСТЕМЫ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Технический редактор	С. Н. Красовская
Компьютерная вёрстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№1/156 от 24.01.2014.  
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский  
университет», 2018



## Содержание

Введение.....	4
1 Размерности магнитных и электрических величин. Действия над размерностями .....	5
2 Расчет поля точечного и линейного магнитного диполя.....	6
3 Расчет поля ленточного магнитного диполя.....	7
4 Расчет магнитостатического поля внутренней несплошности .....	10
5 Расчет электромагнита намагничивающего устройства.....	12
6 Определение оптимального режима при намагничивании объектов.....	17
7 Способы повышения эффективности размагничивания объектов .....	19
8 Решение задач определения условий электрических методов анализа.....	22
9 Методика анализа объекта с помощью магнитного порошка, магнитных жидкостей и суспензий .....	28
10 Решение задач оптимизации вихретокового анализа.....	32
11 Использование годографов ЭДС измерительной обмотки вихретокового преобразователя для определения условий контроля .....	35
12 Решение задач измерения удельной электрической проводимости в объектах.....	39
13 Изучение принципов работы, калибровки и поверки ЯМР-томографов .....	41
14 Защита от вредного воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей на человека.....	47
Список литературы .....	48



## Введение

Целью дисциплины «Электромагнитные аппараты и системы» является ознакомление студентов с физикой магнитных, электрических и электромагнитных явлений, принципами построения приборов и устройств, основанных на регистрации воздействия магнитных, электрических и электромагнитных полей на биологические объекты либо на измерениях электрических и электромагнитных характеристик объектов, с методическими и технологическими вопросами применения магнитных, электрических и вихретоковых методов для диагностики, терапии биологических объектов и экологического мониторинга.

В этой связи настоящие методические рекомендации содержат такие важные вопросы, как размерности магнитных и электрических величин; действия над размерностями; расчет поля точечного, линейного и ленточного магнитного диполя; определение оптимального режима при намагничивании объектов; расчет электромагнита намагничивающего устройства; способы повышения эффективности размагничивания объектов; решение задач определения условий электрических методов анализа; методика анализа объекта с помощью магнитного порошка, магнитных жидкостей и суспензий; решение задач оптимизации вихретокового анализа с использованием проходных и накладных преобразователей; решение задач измерения удельной электрической проводимости в объектах; изучение принципов работы, калибровки и поверки МРТ-томографов; защита от вредного воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей на человека.

Приведены задания для практических занятий по дисциплине, методические рекомендации по их выполнению, используемая литература.



# 1 Размерности магнитных и электрических величин. Действия над размерностями

## Задачи и контрольные вопросы

1 Назовите единицы измерения  $B$ ,  $\mu_a$ ,  $\mu_0$ ,  $\mu_d$ ,  $\Phi$ ,  $H$ ,  $M$ ,  $C$ .

2 Среди написанных выражений укажите верные:

а)  $\text{Дж} = \text{В}\cdot\text{с}$ ,  $\text{Дж} = \text{Ом}\cdot\text{с}$ ,  $\text{Дж} = \text{В}\cdot\text{А}\cdot\text{с}$ ;

б)  $\text{Гн} = \text{В}\cdot\text{с}$ ,  $\text{Гн} = \text{Ом}\cdot\text{с}$ ,  $\text{Гн} = \text{В}\cdot\text{А}\cdot\text{с}$ ;

в)  $\text{Вб} = \text{В}\cdot\text{с}$ ,  $\text{Вб} = \text{Ом}\cdot\text{с}$ ,  $\text{Вб} = \text{В}\cdot\text{А}\cdot\text{с}$ .

3 Известно, что в магнитном поле на проводник с током действует сила, направление которой определяется по правилу левой руки. Отношение силы  $F$  к длине  $l$  проводника и току  $I$  в нем – величина постоянная;  $B = \frac{F}{I \cdot l}$ . Покажите,

что  $\frac{[\text{Н}]}{[\text{А}] \cdot [\text{М}]} = \frac{[\text{Вб}]}{[\text{М}]^2} = [\text{Тл}]$ .

4 Сила, с которой электромагнит или постоянный магнит притягивается к ферромагнитному объекту,  $F = \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot S$ , где  $B$  – величина магнитной индукции в зазоре между полюсом магнита и поверхностью объекта,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $S$  – сечение полюса.

Покажите, что  $\frac{[\text{Тл}]^2}{[\text{Гн}]} \cdot [\text{М}]^2 = [\text{Н}]$ .

5 Определите размерность обобщенного параметра  $x_2 = R_2 \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$  при вихретоковом анализе.

6 Емкость преобразователя в СИ определяется из выражения:  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ .

Покажите, что  $\frac{[\text{Кл}]^2}{[\text{Н}] \cdot [\text{М}]^2} \cdot [\text{М}]^2 = \frac{[\text{Кл}]}{[\text{В}]} = [\text{Ф}]$ .

## 2 Расчет поля точечного и линейного магнитного диполя

### 2.1 Расчет магнитоэстатических полей поверхностных несплошностей

#### 2.1.1 Основные предпосылки.

Для успешного обнаружения дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов необходимо иметь достаточно полную информацию о пространственном распределении магнитных полей вблизи контролируемой поверхности. В общем случае расчет электромагнитных полей рассеяния от дефекта представляет собой весьма сложную математическую задачу и практически неосуществим, т. к. реальные дефекты имеют сложные геометрические формы и могут различаться по физической природе. Однако в ряде случаев эти неоднородности имеют простую форму и могут быть аппроксимированы эквивалентными магнитными диполями. Таковы, например, дефекты в виде вмятин, рисок. Дефекты вида трещин отличаются тем, что у них глубина намного больше ширины. У таких дефектов «магнитные заряды» распределяются в двух измерениях – по длине и глубине. Поле их можно уподобить полю ленточного магнитного диполя, ширина и высота которого совпадают с параметрами действительного дефекта.

#### 2.1.2 Топография поля дефекта, эквивалентного точечному диполю.

Точечный «магнитный заряд»  $+m$  или  $-m$ , находясь в вакууме, создает в некоторой точке  $M$  окружающего пространства поле напряженностью

$$\vec{H} = \pm \frac{m}{R^3} \cdot \vec{R}, \quad (2.1)$$

где  $R$  – радиус-вектор, проведенный из полюса  $m$  в точку  $M$ .

Определим составляющие поля двух зарядов противоположного знака, расположенных на расстоянии  $2b$  друг от друга (магнитный диполь с базой  $2b$ ) (рисунок 2.1).

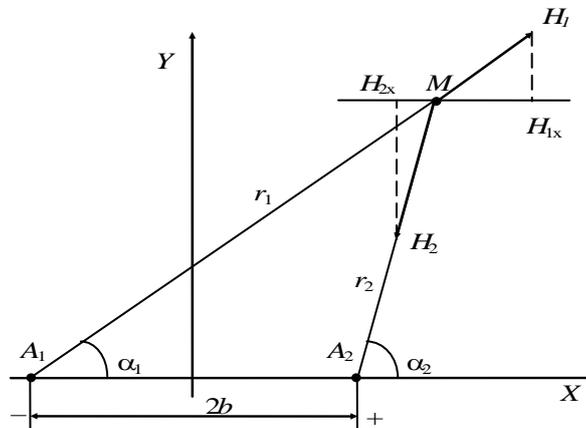


Рисунок 2.1 – Расчет магнитного поля дефекта, эквивалентного точечному и линейному диполям

**Задание 1**

Используя рисунок 2.1 и выражение (2.1), показать, что

$$H_x = H_{1x} - H_{2x} = m \cdot \left( \frac{x+b}{\left((x+b)^2 + y^2\right)^{3/2}} - \frac{x-b}{\left((x-b)^2 + y^2\right)^{3/2}} \right); \quad (2.2)$$

$$H_y = m \cdot \left( \frac{y}{\left((x+b)^2 + y^2\right)^{3/2}} - \frac{y}{\left((x-b)^2 + y^2\right)^{3/2}} \right). \quad (2.3)$$

**2.1.3 Топография поля дефекта, эквивалентного линейному диполю.**

Известно, что положительно заряженная бесконечно длинная нить создает в произвольной точке  $M$  на расстоянии  $r$  от нее поле

$$\bar{H} = \frac{c \cdot \sigma_l \cdot \bar{r}}{r^2}, \quad (2.4)$$

где  $c$  – постоянный коэффициент, зависящий от системы единиц,  $c = 2$ ;  
 $\sigma_l$  – линейная плотность «магнитных зарядов».

**Задание 2**

Используя рисунок 2.1 и выражение (2.4), показать, что

$$H_x = - \frac{4 \cdot \sigma_l \cdot b \cdot (x^2 - y^2 - b^2)}{\left((x+b)^2 + y^2\right) \cdot \left((x-b)^2 + y^2\right)}; \quad (2.5)$$

$$H_y = - \frac{8 \cdot \sigma_l \cdot b \cdot x \cdot y}{\left((x+b)^2 + y^2\right) \cdot \left((x-b)^2 + y^2\right)}. \quad (2.6)$$

**3 Расчет поля ленточного магнитного диполя**

На «дне» полости и граничных поверхностях изделия «магнитных зарядов» от внешнего намагничивающего поля не образуется, т.к. оно направлено параллельно этим граням. «Магнитные заряды» здесь образуются только от вторичного поля «заряженных» граней дефекта, и они настолько малы, что действием их можно пренебречь.

Для ленточного диполя (рисунок 3.1) шириной  $2b$  и глубиной  $h$  необходимо учитывать «магнитный заряд»  $dQ$ , расположенный не по элементу нити, а по элементу поверхности  $dS$  грани с поверхностной плотностью «зарядов»  $\sigma(\eta)$ .



$$dQ = \sigma(\eta) dS_n, \quad (3.1)$$

где  $\eta$  изменяется в пределах от 0 до  $h$ .

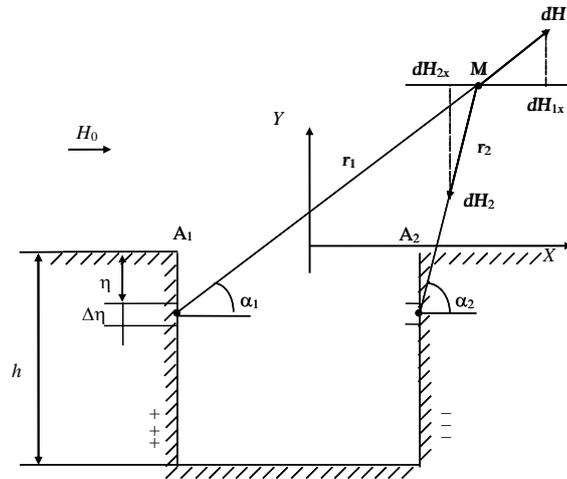


Рисунок 3.1 – Расчет магнитного поля дефекта, эквивалентного ленточному диполю

Выражение для напряженности поля в точке  $M$  от действия «зарядов», расположенных на одной из граней диполя, от элемента поверхности шириной  $d\eta$  записываются следующим образом:

$$d\bar{H}_1 = \frac{2\sigma(\eta)dS_n}{r_1^2}. \quad (3.2)$$

Принимая во внимание, что

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \frac{x+b}{r_1}; & \sin \theta_1 &= \frac{y+\eta}{r_1}; & \cos \theta_2 &= \frac{x-b}{r_2}; & \sin \theta_2 &= \frac{y+\eta}{r_2}; \\ r_1^2 &= (x+b)^2 + (y+\eta)^2; & r_2^2 &= (x-b)^2 + (y+\eta)^2, \end{aligned}$$

получим

$$dH_{1x} = \frac{2\sigma(\eta) \cdot (b+x)d\eta}{(x+b)^2 + (y+\eta)^2}; \quad dH_{1y} = \frac{2\sigma(\eta) \cdot (y+\eta)d\eta}{(x+b)^2 + (y+\eta)^2}.$$

Составляющие поля от отрицательно «заряженной» грани:

$$dH_{2x} = -\frac{2\sigma(\eta) \cdot (x-b)d\eta}{(x-b)^2 + (y+\eta)^2}; \quad dH_{2y} = -\frac{2\sigma(\eta) \cdot (y+\eta)d\eta}{(x-b)^2 + (y+\eta)^2}.$$

При  $\sigma(\eta) = \sigma_n = \text{const}$  составляющие поля ленточного диполя имеют вид:

$$H_x = 2\sigma_n \cdot \left( \operatorname{arctg} \frac{h \cdot (x+b)}{(x+b)^2 + y \cdot (y+h)} - \operatorname{arctg} \frac{h \cdot (x-b)}{(x-b)^2 + y \cdot (y+h)} \right); \quad (3.3)$$

$$H_y = 2\sigma_n \cdot \ln \frac{\left( (x+b)^2 + (y+h)^2 \right) \cdot \left( (x-b)^2 + y^2 \right)}{\left( (x+b)^2 + y^2 \right) \cdot \left( (x-b)^2 + (y+h)^2 \right)}. \quad (3.4)$$

### Задание

Выполнить расчет тангенциальной  $\frac{H_x}{\sigma}$  и нормальной  $\frac{H_y}{\sigma}$  составляющих магнитного поля на поверхности пластины. Поле создается магнитными полюсами, возникающими на боковых гранях подкладки, уложенной с обратной стороны пластины толщиной  $s$  на ее поверхность. Подкладка имеет ширину  $l$  и толщину  $\delta$ , плотно прилегает к внутренней поверхности пластины широкой стороной  $l$ , имеет параллельные боковые грани, причем вектор напряженности внешнего поля направлен перпендикулярно этим граням. Наличием зазора между подкладкой и поверхностью пластины пренебречь. Исходные данные взять из таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Данные для расчета

Номер варианта	$s$ , мм	$l$ , мм	$\delta$ , мм
1	2	10	1
2	3	12	2
3	5	13	3
4	4	14	4
5	5	15	5
6	6	16	6
7	7	17	7
8	6	18	1
9	5	19	2
10	4	20	3
11	3	21	4
12	2	22	5
13	2	23	6
14	3	24	7
15	4	25	1
16	5	26	2
17	6	10	3
18	2	12	4

## 4 Расчет магнитоэстатического поля внутренней несплошности

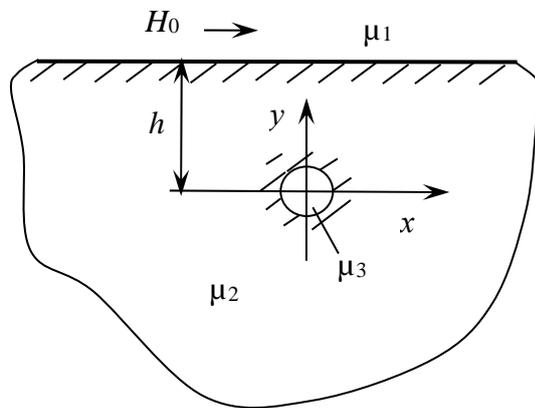
4.1 Анализ составляющих поля несплошности. Н. Н. Зацепин выполнил полный расчет поля несплошности цилиндрической формы радиуса  $r$ , продольная ось которого параллельна поверхности полубесконечного тела. Расчет выполнен для случая  $\mu = \text{const}$ . Расчетная схема приведена на рисунке 4.1. Получены математические выражения для составляющих напряженности поля рассеяния дефекта, ориентированных перпендикулярно и параллельно поверхности объекта:

$$H_{dx} = - \frac{2\mu_2(\mu_2 - \mu_1)r^2 H_0}{(\mu_2 + 1)(\mu_2 + \mu_3) - (\mu_2 - 1)(\mu_2 - \mu_3) \left(\frac{r}{h}\right)^2} \cdot \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2}, \quad y \geq b; \quad (4.1)$$

$$H_{dy} = - \frac{2\mu_2(\mu_2 - \mu_3)r^2 H_0}{(\mu_2 + 1)(\mu_2 + \mu_3) - (\mu_2 - 1)(\mu_2 - \mu_3) \left(\frac{r}{h}\right)^2} \cdot \frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2}, \quad y \geq b. \quad (4.2)$$

### Задание

Исследовать изменение  $H_{dx}$  и  $H_{dy}$  для случая  $\mu_2 \gg \mu_1 = \mu_3 = 1$ ,  $r \ll h$ ,  $x = 0$ ,  $y = h$ . Сделать выводы.



$\mu_1$  – магнитная проницаемость воздуха;  $\mu_2$  – магнитная проницаемость материала объекта;  $\mu_3$  – магнитная проницаемость материала дефекта

Рисунок 4.1 – Расчетная схема

#### 4.2 Расчет составляющих поля дефекта на поверхности полубесконечного тела.

##### Задание

Определить характер изменения тангенциальной  $H_x$  и нормальной  $H_y$  составляющих магнитостатического поля внутренней цилиндрической несплошности в воздухе на расстоянии  $\Delta$  от поверхности полубесконечного ферромагнитного тела, если магнитная проницаемость окружающей среды  $\mu_1$ , материала объекта контроля  $\mu_2$  и дефекта  $\mu_3$ . Причем  $\mu_2 \gg \mu_1 = \mu_3$ . Вектор напряженности намагничивающего поля направлен параллельно плоской поверхности полубесконечного тела, перпендикулярно продольной оси дефекта. По результатам расчетов нужно построить графики зависимостей  $H_x = f(x)$  и  $H_y = f(x)$ . Исходные данные в соответствии с обозначениями на рисунке 4.1 содержатся в таблице 4.1. Необходимые указания приводятся ниже таблицы.

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчета

Номер варианта	$H_0$ , А/м	$r$ , мм	$h$ , мм	$\Delta$ , мм
1	10 <sup>4</sup>	0,5	6	0
2		1,0	8	0,5
3		1,0	10	0,25
4		1,25	12	0,5
5		1,5	14	1,0
6		2,2	15	1,5
7		1,6	12	0
8		1,4	14	1,2
9		0,8	12	1,0
10		1,2	10	1,5
11		1,5	15	0,5
12		1,3	14	0
13		1,1	10	0,5
14		1,2	6	1,0
15		12,6	6	1,5
16		1,0	9	1,2
17		1,2	12	0,6
18		1,4	12	1,5

В системе координат, выбранной согласно рисунку 4.1, составляющие поля цилиндрической несплошности в полубесконечном теле (без учета влияния границы раздела сред) определяются из выражений (4.1) и (4.2).

Если  $\mu_2 \gg \mu_1 = \mu_3$ , то обе формулы приводятся к виду

$$H_x = -\frac{2r^2 H_0}{1 - \frac{r^2}{h^2}} \cdot \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2}; y \geq h; \quad (4.3)$$

$$H_y = -\frac{2r^2 H_0}{1 - \frac{r^2}{h^2}} \cdot \frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2}; \quad y \geq h. \quad (4.4)$$

При  $r \ll h$  можно пренебречь слагаемым  $\frac{r^2}{h^2}$ . В расчетах следует принять  $y = h + \Delta$ . Так как  $H_x(x)$  – четная функция, то график зависимости строится для полуплоскости, а затем отражается симметрично относительно оси  $y$ .

$H_y(x)$  – нечетная функция. Ее график строится для всей плоскости (или для полуплоскости, а затем выполняется кососимметричное отражение кривой относительно осей).

## 5 Расчет электромагнита намагничивающего устройства

Расчет выполнен по методике, изложенной в [1]. Схема намагничивающего устройства изображена на рисунке 5.1.

Цель расчета – определить величину намагничивающей силы  $IW$  устройства для создания в изделии необходимой индукции.

С учетом требований технического, технологического и экономического плана для магнитных приспособлений могут быть рекомендованы стали Ст3, 10, 20 и сталь Армко.

Толщина полюсов намагничивающего устройства (НУ) [1] должна быть в 2...3 раза больше толщины намагничиваемого изделия. Если же толщина стенки изделия 1...2 мм, то толщина полюсов – 10...20 мм. Остальные размеры намагничивающего устройства выбирают конструктивно, исходя из существующих разработок.

Например, расстояние  $L$  между полюсами электромагнита – не менее 70 мм, высота  $h$  – не менее 100 мм. Расчет выполняют, принимая допущение, что растекание магнитного потока в изделии отсутствует, т. е. размеры проекции устройства на изделие и изделия равны.

Из закона Кирхгофа следует, что

$$IW = \sum H_i \cdot l_i,$$

где  $H_i$  – падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи  $l_i$  (рисунки 5.1 и 5.2).

Рассмотрим сумму падений магнитных напряжений в изделии  $U_u$ , в зазорах  $U_y$ , в магнитопроводе  $U_n$ :

$$\begin{cases} U_u = H_u \ell_u = H_u (L + b + d); \\ \Phi_u = B_u S_u, \quad S_u = bc. \end{cases} \quad (5.1)$$



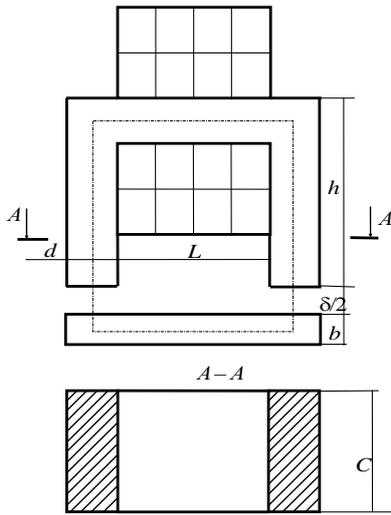


Рисунок 5.1 – Расчетная схема электромагнита намагничивающего устройства

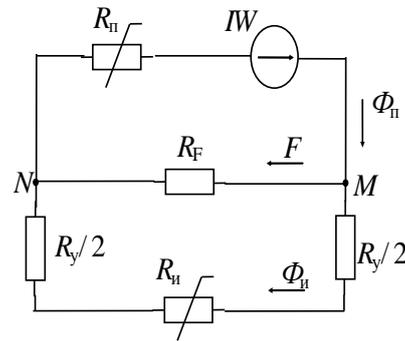


Рисунок 5.2 – Эквивалентная электрическая схема электромагнита намагничивающего устройства

Строим кривую намагничивания материала изделия (рисунок 5.3). Используя выражения (5.1), по 10...12 значениям  $H_u$  и  $B_u$ , взятым с кривой намагничивания, строим график зависимости  $U_u = f(\Phi_u)$ , а затем  $U_y = f(\Phi_u)$  в той же системе координат (см. рисунок 5.3).

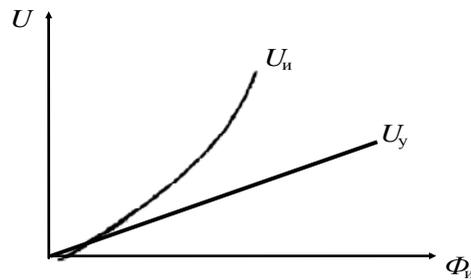


Рисунок 5.3 – Зависимости магнитных напряжений в зазоре  $U_y$  и в изделии  $U_u$  от магнитного потока в изделии

$$U_y = H_0 \cdot \delta = \frac{\Phi_{II}}{\mu_0 \cdot S_n} \cdot \delta, \quad (5.2)$$

где  $H_0$  – напряженность поля в зазоре;  
 $\delta$  – толщина суммарного зазора;  
 $S_n = cd$ .

Из выражения (5.2) следует, что для построения прямой достаточно рассмотреть одно значение  $\Phi_u$ .

Затем на отдельном графике строим кривую падения магнитного напряжения в магнитопроводе в зависимости от потока в нем  $U_n = f(\Phi_n)$  (рисунок 5.4).

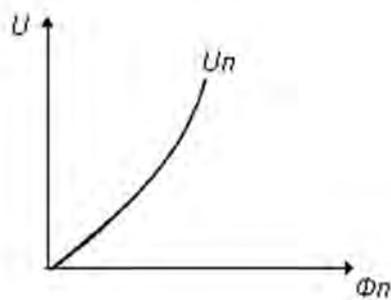


Рисунок 5.4 – Зависимость магнитного напряжения в магнитопроводе от магнитного потока в нем

$$\begin{cases} U_n = H_n \cdot \ell_n = H_n \cdot (2h + L); \\ \Phi_n = B_n \cdot S_n = B_n \cdot c \cdot d. \end{cases} \quad (5.3)$$

Значения  $B$  и  $H$  определяют по кривой намагничивания материала магнитопровода.

Чтобы пересчитать  $U_n$  в зависимости от  $\Phi_u$ , запишем уравнение Кирхгофа для точки М эквивалентной электрической схемы (см. рисунок 5.2).

$$\Phi_n - \Phi_u - F = 0, \quad (5.4)$$

где  $F$  – магнитный поток рассеяния, шунтирующий изделие и переходный участок.

Так как отношение потоков  $\Phi_u$  и  $F$  обратно пропорционально магнитным сопротивлениям  $R_u + R_y$  и  $R_F$ , то

$$\frac{F}{\Phi_u} = \frac{R_u + R_y}{R_F}; \quad F = \Phi_u \cdot \frac{R_u + R_y}{R_F}, \quad (5.5)$$

где  $R_F$  – магнитное сопротивление потока рассеяния между полюсами электромагнита:

$$R_F = \frac{1}{G_F}; \quad (5.6)$$

$G_F$  – проводимость участка между параллельными призмами (полюсами намагничивающего устройства):

$$G_F = R_F^{-1} = \mu_0 (h_F x_F + y_F), \quad (5.7)$$

где  $h_F = h - d$ ;  $x_F = \frac{C}{L} + 0,52 + \frac{2}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{2d}{L} \right)$ ;

$$y_F = 0,26C + \frac{C}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{2d}{L} \right) + 0,15L + 0,5d.$$



Из (5.4) и (5.5):

$$\Phi_u = \frac{\Phi_n}{1 + \frac{R_u + R_y}{R_F}}, \quad (5.8)$$

где  $R_F$  получаем из (5.6) и (5.7) – оно постоянно;

$$R_y = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S_{II}} \text{ – тоже постоянно.}$$

$$R_u = \frac{\ell_u}{\mu_0 \cdot \mu_u \cdot S_u} = \frac{H_u \cdot \ell_u}{B_u \cdot S_u},$$

где  $\ell_u$  – длина средней линии магнитного потока в изделии;

$B_u$  и  $H_u$  – соответствуют оптимальному режиму намагничивания.

Путем пересчета с использованием формулы (5.6) из последнего графика получаем зависимость  $U_n = f(\Phi_u)$  (рисунок 5.5). Затем, суммируя  $U_u$ ,  $U_y$ ,  $U_n$ , получаем зависимость  $U_\Sigma = f(\Phi_u)$  (рисунок 5.6). Зная сечение изделия, строим вторую ось ( $B_u$ ), т. е. аналогичную зависимость  $U_\Sigma = f(B_u)$  (где  $B_u = \Phi_u/S_u$ ).

По известному значению оптимальной индукции  $B_{\text{опт}}$  в контролируемом сечении определяем  $U_1 = I W$  (см. рисунок 5.6).

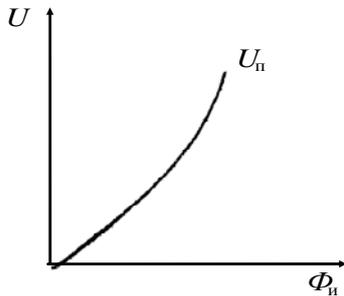


Рисунок 5.5 – Зависимость магнитного напряжения в магнитопроводе от магнитного потока в изделии

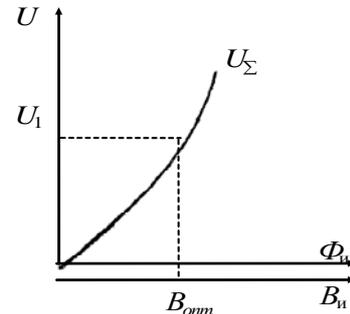


Рисунок 5.6 – Зависимость суммарного магнитного напряжения в магнитопроводе от магнитного потока и индукции в изделии

Затем с учетом коэффициента заполнения  $K_3 = 0,4$  и площади  $S$  окна, занимаемого всеми витками катушки, в сечении, перпендикулярном осям витков ( $S$  составляет приблизительно 80 % площади окна, образованного П-образным сердечником и намагничиваемым изделием), определяем число витков обмоточного провода, задаваясь различными его диаметрами  $d$  (от 0,5 до 3,5 мм):

$$W_1 = \frac{S \cdot K_3}{\pi \cdot d_1^2} \cdot 4$$

Определяем величину тока в катушке по известным намагничивающей силе и числу витков  $I_1 = U_1/W_1$ . При этом следует помнить, что расчет

выполнен для случая плоских изделий и не учитывает растекание магнитного потока в изделии. Для намагничивания сварных соединений с усилением шва ток нужно увеличить в 6...8 раз. Должно также выполняться ограничение по плотности тока  $j \leq 12 \text{ А/мм}^2$ .

Определяем электрическое сопротивление обмотки:

$$R = \frac{\rho \cdot l_{cp} \cdot W_1}{\frac{\pi \cdot d_1^2}{4}}$$

и потребляемую мощность

$$P = I_1^2 \cdot R,$$

в каждом случае (где  $l_{cp}$  – средняя длина витка провода в катушке;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление медного провода).

Если потребляемые мощности одинаковы, то диаметр провода выбирают исходя из приемлемого числа витков катушки.

### Задание

Выполнить расчет электромагнита, используя данные таблицы 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета

Номер варианта	$b$ , мм	$\delta$ , мм	$h$ , мм	$c$ , мм	$B_{онм}$ , Тл
1	4	1	100	200	0,8
2	5		110		1,0
3	6		120		1,1
4	7		130		1,2
5	8		140		1,3
6	9		100		1,4
7	10		110		1,5
8	11		120		1,6
9	12		130		1,7
10	13		140		0,8
11	14		100		1,0
12	15		110		1,1
13	16		120		1,2
14	17		130		1,3
15	18		140		1,4
16	19		100		1,5
17	20		110		1,6
18	4		120		1,7



## 6 Определение оптимального режима при намагничивании объектов

По данным [1] строим кривую намагничивания материала контролируемого изделия  $B = f(H)$ , (рисунок 6.1). Используя данные этой кривой, строим график зависимости  $\mu_r = B/(\mu_0 H) = f(B)$  (рисунок 6.2). Расчет оптимального режима намагничивания сводится к отысканию максимального приращения производной на падающей (правой) ветви данной кривой. Максимальное приращение производной  $d\mu_r/dB$  находим в месте перегиба графика функции  $\mu_r(B)$  на ее ниспадающей ветви (в этой точке  $d^2\mu_r/dB^2 = 0$ ). Простейший способ найти  $d^2\mu_r/dB^2$  – заменить табличные значения функции  $\mu_r = f(B)$  соответствующим интерполяционным многочленом

$$\mu_r = aB^3 + bB^2 + cB + d,$$

где  $a, b, c, d$  – неизвестные коэффициенты.

$$\begin{aligned} \frac{d\mu_r}{dB} &= 3aB^2 + 2bB + c; \\ \frac{d^2\mu_r}{dB^2} &= 6aB + 2b = 0; \\ B &= -\frac{b_{cp}}{3a_{cp}}. \end{aligned} \quad (6.1)$$

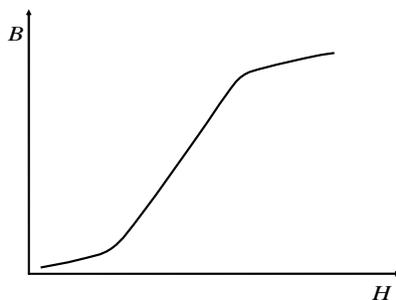


Рисунок 6.1 – Кривая намагничивания материала изделия

Чтобы определить значения  $b_{cp}$  и  $a_{cp}$ , можно воспользоваться методом наименьших квадратов или решить ряд систем уравнений, подставляя численные значения  $B$  и  $\mu_r$  из кривой  $\mu_r(B)$ :

$$\begin{cases} \mu_{r1} = a \cdot B_1^3 + b \cdot B_1^2 + c \cdot B_1 + d; \\ \mu_{r2} = a \cdot B_2^3 + b \cdot B_2^2 + c \cdot B_2 + d; \\ \mu_{r3} = a \cdot B_3^3 + b \cdot B_3^2 + c \cdot B_3 + d; \\ \mu_{r4} = a \cdot B_4^3 + b \cdot B_4^2 + c \cdot B_4 + d. \end{cases} \quad (6.2)$$

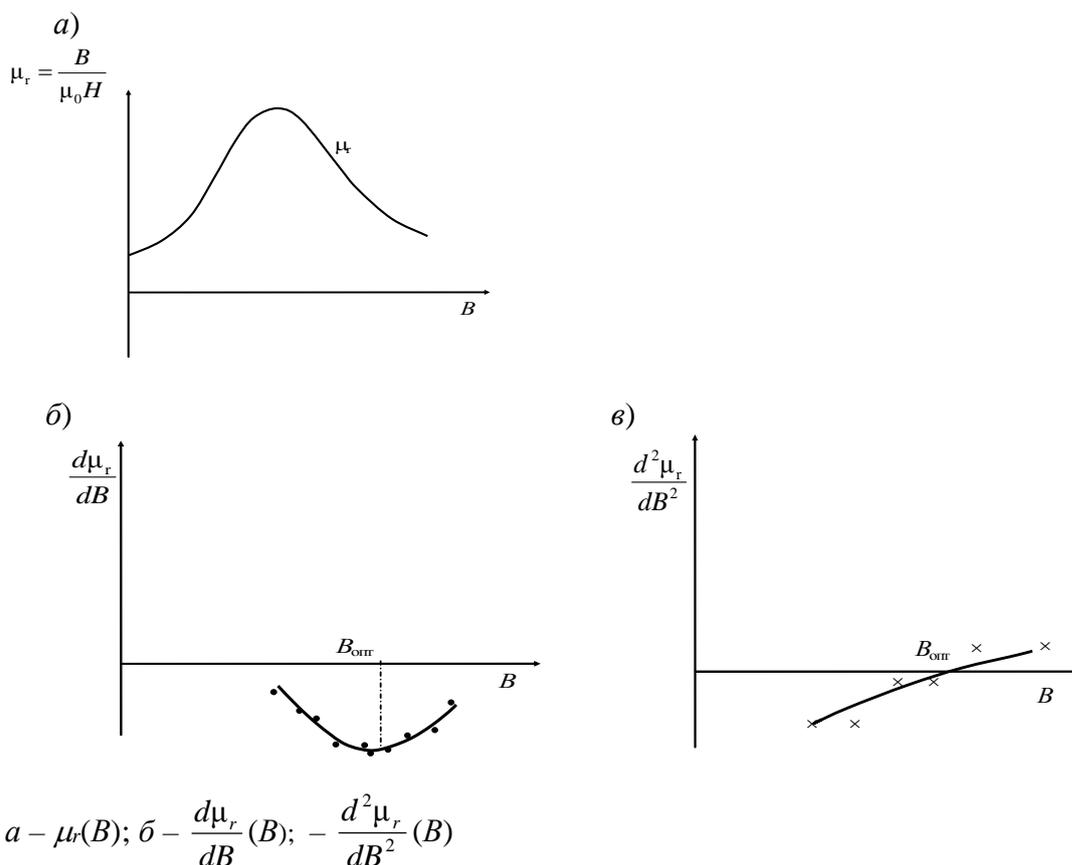


Рисунок 6.2 – Графики зависимостей от индукции в исследуемом сечении

Вычислив  $b_{cp}$  и  $a_{cp}$  и подставив в (6.1), получим значение  $B_{opt}$ .

Возможен и графический путь определения  $B_{opt}$ , который состоит в следующем: по приближенным формулам определяем  $d\mu_r/dB$  и  $d^2\mu_r/dB^2$ , используя значение  $\mu_r$  нисходящей ветви кривой  $\mu_r(B)$  для точек  $B_i \pm h/2$  и  $B_i \pm h$  (где  $h$  – шаг):

$$\frac{d\mu_r}{dB} \approx \frac{\mu_r\left(B_i + \frac{h}{2}\right) - \mu_r\left(B_i - \frac{h}{2}\right)}{h}; \quad (6.3)$$

$$\frac{d^2\mu_r}{dB^2} \approx \frac{\mu_r(B_i + h) - 2\mu_r(B_i) + \mu_r(B_i - h)}{h}. \quad (6.4)$$

Оптимальному режиму намагничивания соответствует точка пересечения графика функции  $d^2\mu_r/dB^2$  с осью абсцисс и минимум функции  $d\mu_r/dB$  (см. рисунок 6.2).

Следует отметить, что расчетное значение  $B_{opt}$  ниже значения, полученного экспериментально, на 10...20 %. Это нужно учесть в окончательном результате.

### Задание

Используя данные [1, приложение Г], по указанию преподавателя, выполнить расчет оптимального режима намагничивания одним из вышеописанных способов.

## 7 Способы повышения эффективности размагничивания объектов

### 7.1 Способы размагничивания

Срок эксплуатации различных изделий, например, подшипников качения, при наличии остаточной намагниченности сокращается в несколько раз. Это объясняется втягиванием в места контакта мельчайших ферромагнитных частиц, которые нарушают нормальный режим работы изделия. Кроме того, вследствие затраты дополнительной энергии на преодоление магнитных сил и дополнительных сил трения значительно увеличиваются затраты энергии и падает выходная мощность оборудования. В ряде случаев остаточная намагниченность объекта может сильно повлиять на работу навигационного оборудования.

В настоящее время применяют в основном два способа размагничивания:

- нагревание объекта выше точки Кюри;
- воздействие на объект переменным магнитным полем с убывающей до нуля амплитудой.

Первый способ применяется достаточно редко, т. к. приводит к снижению механических свойств объекта. При размагничивании детали в переменных магнитных полях максимальная амплитуда размагничивающего поля устанавливается не ниже напряженности поля, в котором объект был намагничен. Частота размагничивающего поля обычно составляет 1...50 Гц.

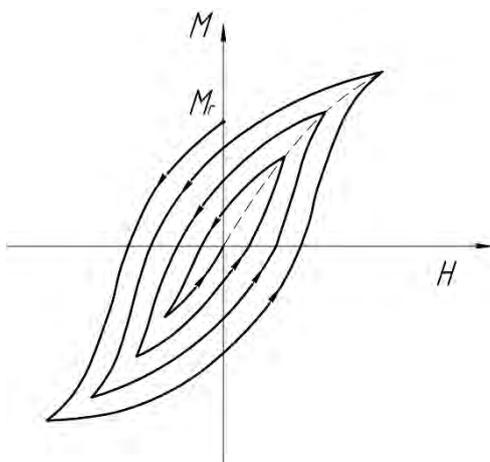


Рисунок 7.1 – Изменение намагниченности детали при ее размагничивании

Считается, что для *качественного* размагничивания детали количество циклов перемагничивания должно быть не меньше 40. Размагничивание в переменном поле можно осуществить по-разному, а именно:

- с помощью демагнетизатора (соленоида, напряженность переменного поля в котором автоматически уменьшается от максимального значения до нуля);
- путем удаления размагничиваемого объекта из соленоида, который питается источником переменного тока с постоянным напряжением (при этом объект по мере удаления от соленоида поворачивается в различных плоскостях

вплоть до расстояния 3...5 внутренних диаметров соленоида или его диагонали, если соленоид имеет прямоугольное сечение);

- удалением детали из межполюсного пространства электромагнита, питаемого от источника переменного тока;

- путем пропускания через деталь переменного тока с убывающей до нуля амплитудой.

Чем *больше* частота  $\omega$  размагничивающегося поля, магнитная проницаемость  $\mu$  материала объекта, его удельная электрическая проводимость  $\sigma$ , тем *на меньшую* глубину проникает размагничивающее поле и тем меньшей толщины деталь можно размагничивать. Например, если в поле частотой 50 Гц можно эффективно размагнитить деталь толщиной 2 мм из материала с коэрцитивной силой 10...15 А/см, то в поле частотой 1 Гц можно размагнитить детали толщиной до 30 мм из того же материала.

Считают, что деталь размагничена, если её остаточная намагничённость не превышает намагничённости детали полем Земли больше, чем в 3 раза.

*Замечания* – Следует также помнить, что если намагничённую деталь подвергнуть ударным нагрузкам, то её остаточная намагничённость вследствие дезориентации доменов уменьшится.

Намагничённую деталь можно размагнитить и за один цикл, если подобрать соответствующим образом напряжённость размагничивающего поля (рисунок 7.2).

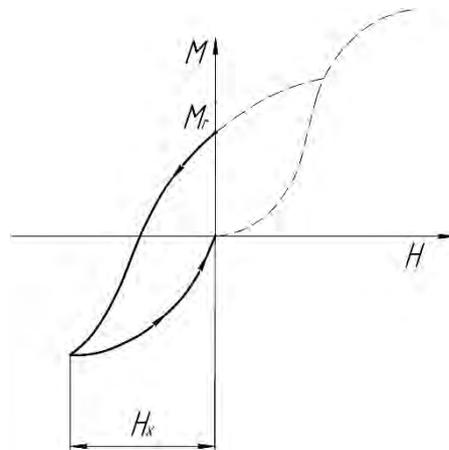


Рисунок 7.2 – К пояснению способа размагничивания объекта за один цикл

## 7.2 Оценка качества размагничивания объекта

Для определения качества размагничивания детали определяют показатель размагниченности  $K$ .

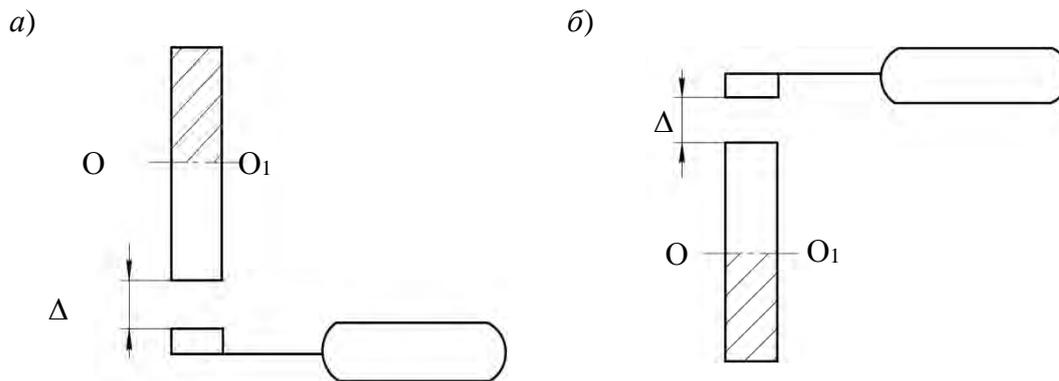
$$K = C_e \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}, \quad (7.1)$$

где  $C_e$  – коэффициент, определяемый по таблице и зависящий от геогра-

фического места контроля;

$\alpha_1, \alpha_2$  – показания прибора при измерении напряжённости магнитного поля у детали.

Для определения показателя размагниченности деталь располагают вертикально, затем на некотором расстоянии  $\Delta$  от одного из концов детали определяют напряженность поля (отклонение стрелки прибора  $\alpha_1$ ) (рисунок 7.3, а). Затем деталь вместе с преобразователем поворачивают на  $180^\circ$  вокруг малой оси  $O-O_1$  и производят повторное измерение напряженности поля на том же расстоянии  $\Delta$  от края детали (показание прибора  $\alpha_2$ ) (рисунок 7.3, б). Подставляя полученные значения в (7.1), определяют показатель размагниченности  $K$ .



а – расположение магнитного преобразователя относительно детали при первом измерении; б – расположение магнитного преобразователя относительно детали при втором измерении

Рисунок 7.3 – Определение качества размагничивания детали

В большинстве случаев считают, что деталь размагничена, если  $K \leq 3$ . Если же  $K > 3$ , то деталь следует подвергнуть размагничиванию, например путем удаления из соленоида, питаемого от источника переменного тока. При этом максимальная скорость перемещения детали определяется по формуле

$$V_{\max} = \frac{H_{\max} (1 - c) \cdot f}{\left( \frac{dH}{dx} \right)_{\max}}, \quad (7.2)$$

где  $H_{\max}$  – максимальная напряженность магнитного поля внутри соленоида;

$c$  – коэффициент, равный отношению амплитуды напряженности поля последующего цикла к амплитуде предыдущего цикла,  $c = \frac{H_2}{H_1} \leq 0,95$ ;

$f$  – частота размагничивающего поля;

$\left( \frac{dH}{dx} \right)_{\max}$  – максимальный градиент напряженности магнитного поля по траектории движения детали.

Если при определении показателя размагниченности деталь не удается расположить вертикально, то её располагают горизонтально, ориентируя *с юга на север*. В этом случае показатель размагниченности определяется по следующей формуле:

$$K = C_r \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}. \quad (7.3)$$

Если объект крупногабаритный, то в технических условиях на него должно быть указано, какая максимальная тангенциальная составляющая напряженности поля у поверхности объекта допустима. Напряженность поля измеряют, например, с помощью ИОН-3.

### **Задание**

Построить графики зависимостей  $V_{\max}(f)$ ,  $V_{\max}(H_{\max})$ ,  $V_{\max}(c)$ ,  $V_{\max}\left(\frac{dH}{dx}\right)_{\max}$ .

## **8 Решение задач определения условий электрических методов анализа**

### **8.1 Электрические методы контроля**

Электрический неразрушающий контроль (НК) – вид НК, основанный на регистрации параметров электрического поля контролируемого объекта или поля, возникающего в результате внешнего воздействия на контролируемый объект.

Классификацию электрических методов контроля проводят по трем признакам:

- 1) по характеру взаимодействия физических полей, с ОК (электрический, трибоэлектрический и термоэлектрический);
- 2) по первичному, информативному параметру электрического поля (электропотенциальный, электроемкостный);
- 3) по способу получения первичной информации (электростатический порошковый, электропараметрический, электроискровой, рекомбинационного излучения, экзоэлектронной эмиссии, шумовой и контактной разности потенциалов).

### **8.2 Электроемкостный метод**

Электроемкостный метод заключается в регистрации электрической емкости и (или) угла диэлектрических потерь первичного преобразователя в виде электрического конденсатора. Емкость электрического преобразователя, состоящего из параллельных пластин, определяется из выражения



$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r (n-1) \frac{S}{d},$$

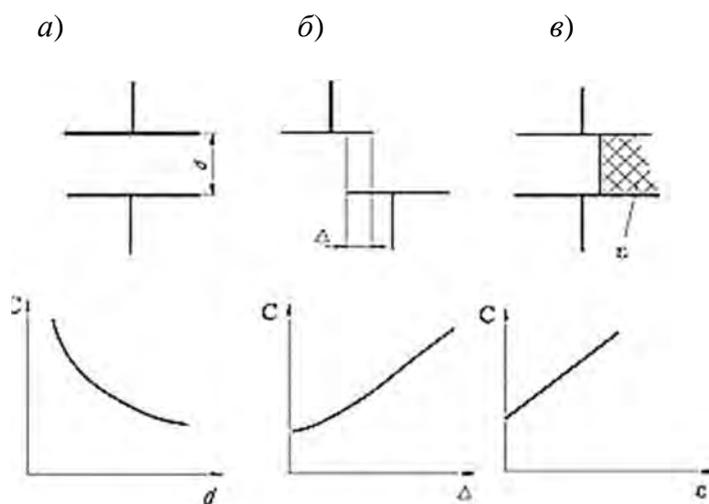
где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума,

$\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость;

$S$  – площадь одной стороны пластины;

$d$  – расстояние между обкладками.

Применение емкостного метода контроля основано на приведённых ниже зависимостях, при этом чаще всего используется первая и третья схемы (рисунок 8.1).



*a* – влияние расстояния между обкладками конденсатора; *б* – перекрытия обкладок конденсатора; *в* – диэлектрической проницаемости, на емкость конденсатора

Рисунок 8.1 – Основные зависимости, используемые при емкостном методе контроля

Так, измерения толщины диэлектрического покрытия на проводящем основании (рисунок 8.2) основаны на использовании формулы:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{\Delta} \quad \text{или} \quad \Delta = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{C} = \frac{k}{C}.$$

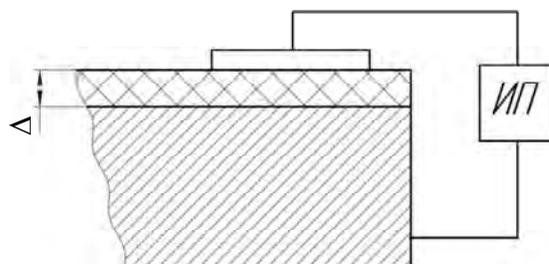


Рисунок 8.2 – К пояснению емкостного метода измерения толщины диэлектрического покрытия

Основной недостаток емкостного метода контроля – зависимость выходного параметра от изменения температуры и влажности воздуха, а также от

ёмкости и индуктивности токопроводящих проводов. Эквивалентная ёмкость измерительного преобразователя с кабелем определяется из выражения

$$C_{\text{экв}} = C[1 + \omega^2 L_k (C_k + C)] + C_k,$$

где  $C$  – ёмкость преобразователя без кабеля;

$C_k$  – ёмкость кабеля;

$L_k$  – его индуктивность;

$\omega$  – частота питающего напряжения.

### 8.3 Электростатическая порошковая дефектоскопия

Метод контроля изобретен в США в 1945 г. Он основан на трибоэлектрическом эффекте, т. е. на получении статического электричества под действием трения. Частицы мела распыляются с помощью пульверизатора, содержащего насадку из твёрдой резины. Так как карбонат кальция в трибоэлектрическом ряду находится выше твёрдой резины, то его частицы заряжаются положительно и используются для измерения трещин в фарфоре, в силикатном стекле, в органическом стекле, в пластмассах, в проводящей керамике, в эмалированных изделиях.

Объекты контроля можно условно разделить на три группы:

- 1) сплавы стекла с металлом;
- 2) эмалированные изделия;
- 3) объекты из неэлектропроводных материалов, например, искусственные зубы.

1 *Контроль объектов, содержащих электропроводящую подложку.*

При распылении над объектом сухого порошка (мела), поверхность объекта покрывается положительно заряженными частицами мела (рисунок 8.3).

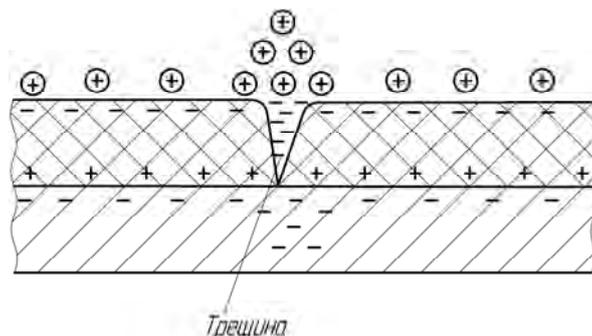


Рисунок 8.3 – Контроль диэлектрических покрытий, нанесенных на электропроводящую подложку

Вследствие этого происходит поляризация диэлектрического покрытия. У нижней поверхности покрытия в металле появляются свободные электроны, причём наибольшее их количество скапливается в месте трещины, т. к. диэлектрическая проницаемость воздуха меньше, чем покрытия. Через трещину

происходит утечка электронов, вследствие чего над трещиной накапливается большое количество мела, который образует индикаторный рисунок. Это позволяет обнаружить трещины раскрытием от 0,1 мкм и более. При этом ширина накопившегося над трещиной порошка может в 30000 раз превышать раскрытие дефекта.

*2 Контроль покрытий при отсутствии под непроводящей поверхностью металлического слоя.*

Для контроля таких объектов используют иогенные вещества. Их наносят на контролируемую поверхность, затем поверхность высушивают (вытирают) и наносят тонкий слой порошка (рисунок 8.4).

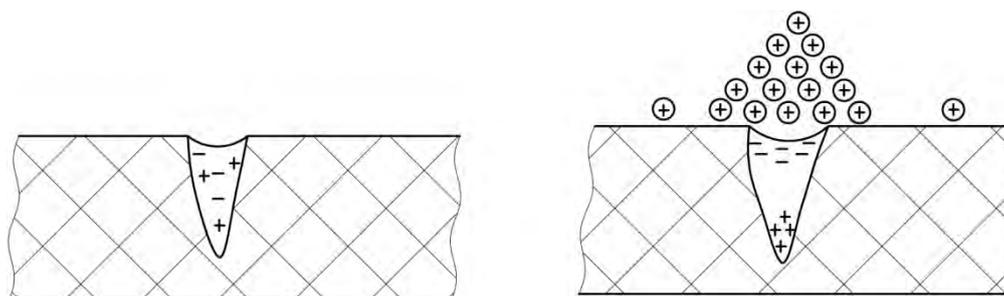
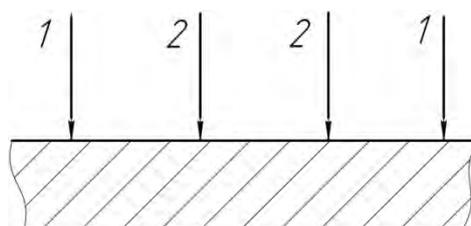


Рисунок 8.4 – Особенности обнаружения дефектов в объектах из неэлектропроводных материалов

В результате распыления порошка происходит поляризация жидкости в трещине. В верхней части трещины оказывается большее количество отрицательных зарядов. Вследствие этого над трещиной произойдет накопление частиц порошка. В качестве иогенной жидкости может быть использован 0,5...1 % раствор стирального порошка.

#### **8.4 Метод контактной разности потенциалов**

*1 Определение толщины листовых материалов.*



*1–1 – токоподводящие электроды; 2–2 – измерительные электроды*

Рисунок 8.5 – Расположение электродов при контроле методом контактной разности потенциалов

Метод контроля основан на измерении падения электрического потенциала между электродами 2–2 при пропускании тока через объект контроля (ОК) с помощью электродов 1–1. Так как падение напряжения зависит

от сопротивления участка электрической цепи между местами контакта электродов 2, то при постоянном расстоянии между электродами 2 для данного материала ОК это сопротивление зависит от толщины стенки объекта. Имеются сведения о применении метода для контроля толщин стенок от 1 до 20 мм. На результаты измерения сильное влияние оказывает возможное наличие трещин.

### 2 Определение глубины трещин.

При измерении глубины трещины расстояние между электродами 2 целесообразно устанавливать не более 2 мм (рисунок 8.6).

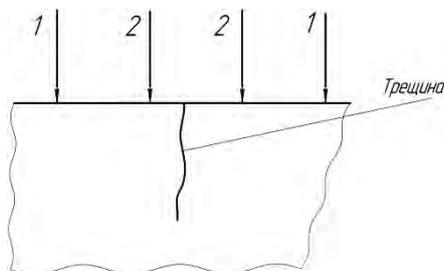


Рисунок 8.6 – Схема измерения глубины трещин методом контактной разности потенциалов

Между токовыми электродами 1 пропускают ток не более 6 А с частотой, около 1500 Гц. Применение тока высокой частоты объясняется тем, что вследствие скин-эффекта токовые линии концентрируются вблизи поверхности и плотно огибают имеющуюся трещину, что позволяет повысить достоверность контроля. Погрешность измерения не превышает 15% от глубины трещины.

## 8.5 Трибоэлектрический метод

Метод основан на возбуждении электрических зарядов при трении разнородных материалов. Трибоэлектрическая разность потенциалов измеряется с помощью микровольтметра и зависит от пары используемых материалов. Приборы имеют специальные натирающие механизмы. В качестве натирающего материала используется какое-либо эталонное (образцовое) вещество. Эталонный образец, закреплённый в патроне этого механизма, перемещается взад-вперёд по чистой поверхности контролируемого объекта. Получающееся в результате этого электрическое напряжение измеряют и сравнивают с напряжением, указанным в таблице. Близкое совпадение с одним из известных значений трибоэлектрических потенциалов в таблице показывает на идентичность испытуемого материала с известным. Так как трение одинаковых материалов не создаёт электризации, то результаты испытаний легко проверить. Нулевая разность трибоэлектрических потенциалов при трении одинаковых материалов будет подтверждать сходство материалов.

Метод удобно использовать для контроля труб, прутков на стеллажах. Важным является то, что результаты измерений не зависят от размеров и формы испытуемых изделий. При контроле металлических изделий трибоэлектрическим методом изделия должны быть изолированы от земли, чтобы исключить утечку зарядов.

## 8.6 Электроискровой метод определения толщины и дефектов в покрытиях

Метод основан на создании разности потенциалов на электродах, между которыми помещают ОК. При наличии в объекте трещин, пор, рыхлот требуется меньшее напряжение на электродах для проскакивания искры между ними. Изменение пробивного напряжения, цвета и яркости искры служит критерием, по которому контролёр судит о годности изделия.

Использование дефектоскопов для электроискрового контроля в условиях цеха требует большой осторожности, так как приходится оперировать напряжениями от 3 до 40 кВ. Для снижения опасности поражения током предложено использовать токи высокой частоты от 1 до 2 МГц. Сканируя щупом поверхность контролируемого изделия, наблюдают за формой и цветом искры. Если покрытие не имеет дефектов, то разряд представляет собой пучок тонких сиренево-фиолетовых линий. При этом разряд происходит практически бесшумно. При наличии пор или трещин в покрытии линии разряда становятся широкими, синевато-белого цвета, а сам разряд сопровождается громким треском.

Для получения изображения дефектов на металлическую пластину, подключенную к высоковольтной обмотке, накладывают фотобумагу в чёрном пакете, а сверху укладывают испытуемый объект. По окончании проверки фотобумагу проявляют по обычной методике. В местах дефектов на бумаге наблюдаются точки, а в случае трещин ряд точек. Метод позволяет контролировать занижение толщины анодированных плёнок в диапазоне от 1 до 60 мкм и определять наличие дефектов в них.

Применяют приборы, позволяющие контролировать анодированные покрытия без их разрушения, т. е. без прожогов в местах пробоев. В приборах используют токи высокой частоты от 0,9 до 1 МГц. Индикатором момента пробоя служит неоновая лампочка, при этом фиксируется начальная стадия пробоя – так называемый туннельный эффект, когда вследствие ионизации наблюдается лавинообразный поток электронов.

## 8.7 Термоэлектрический метод

Термоэлектрический метод может быть использован для измерения толщины гальванических покрытий, для сортировки материалов, контроля структуры и содержания легирующих элементов, для обнаружения ликваций и других дефектов.

Метод основан на измерении термоЭДС, которая возникает между остриём нагретого зонда и исследуемым контролируемым материалом и зависит от сочетания материалов и температуры нагрева места контакта (рисунок 8.7).

Для сортировки материалов может быть использована следующая схема (рисунок 8.8). Если материалы А и Б одинаковые, то показание измерительного прибора будет равно нулю.



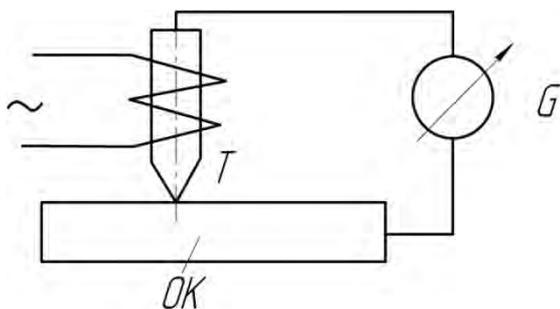


Рисунок 8.7 – К пояснению термоэлектрического метода контроля

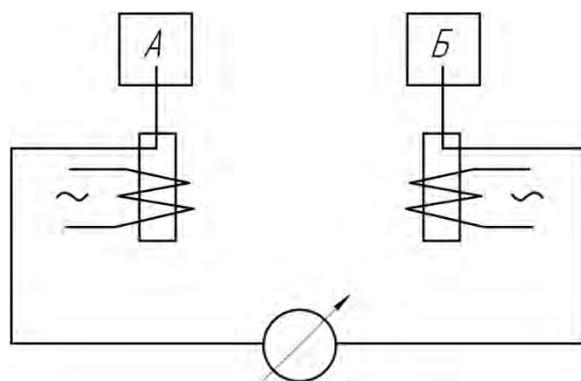


Рисунок 8.8 – Схема сортировки материалов термоэлектрическим методом

Схема, представленная на рисунке 8.9, используется для измерения толщины гальванического покрытия. Возможность такого измерения объясняется следующим. Если материал покрытия и зонда отличаются, то термоЭДС возникает как в точке 1, так и в точке 2, причём величина термоЭДС зависит от удалённости точки 2 от зонда (из-за убывания температуры), а следовательно, от толщины покрытия. Максимальная толщина покрытия – 80...100 мкм.

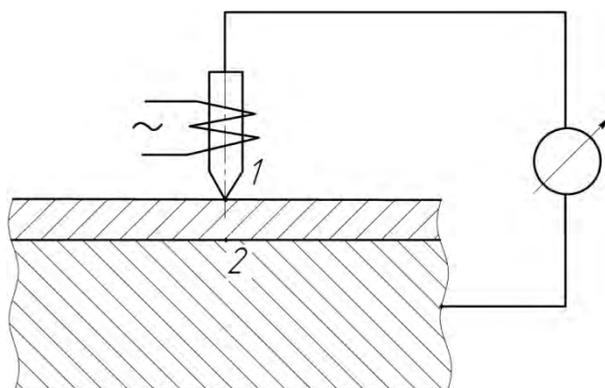


Рисунок 8.9 – Схема измерения толщины гальванического покрытия термоэлектрическим методом

### Задание

Изложить письменно физические основы всех описанных электрических методов анализа.

## 9 Методика анализа объекта с помощью магнитного порошка, магнитных жидкостей и суспензий

**Силы, действующие на ферромагнитную частицу.** Перемещение уединённой частицы магнитного порошка, находящейся в окрестностях дефекта, намагниченного объекта происходит под влиянием равнодействующей затягивающей пондеромоторной силы, силы тяжести частицы, архимедовой

выталкивающей силы и силы трения. Эта равнодействующая сила изображена на рисунке 9.1.

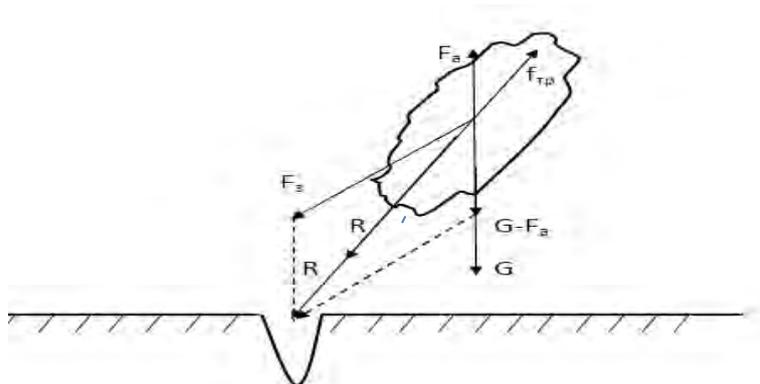


Рисунок 9.1 – Силы, действующие на уединенную частицу магнитного порошка

$$F_з = \mu_0 \cdot \varepsilon_{\square} V H \text{grad} H, \quad (9.1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;

$\varepsilon_{\square}$  – магнитная восприимчивость частицы;

$V$  – её объём;

$H$  – напряжённость магнитного поля;

$\text{grad} H$  – градиент напряжённости магнитного поля.

Отдельные частицы магнитного порошка с течением времени образуют цепочки или конгломераты. Это явление называется автокоагуляцией. В присутствии магнитного поля процесс коагуляции ускоряется. На частицу в цепочке действуют также магнитные силы со стороны других частиц и силы электростатического отталкивания, обусловленные наличием в магнитной суспензии поверхностно-активных веществ.

В формировании индикаторных рисунков несплошностей участвуют в основном как одиночные частицы порошка, так и короткие цепочки. Длинные цепочки создают общий фон в зоне структурной неоднородности металла, грубой обработки поверхности и т. д.

Чтобы в магнитной суспензии вследствие автокоагуляции было меньше длинных цепочек ферромагнитных частиц и конгломератов, в нее добавляют эмульгатор (ОП-7, ОП-10), представляющий собой поляризованные электрические частицы, которые, обволакивая отдельные частицы в цепочке, за счет сил электростатического отталкивания разрывают цепочки. Кроме того, магнитную суспензию периодически пропускают через размагничивающий соленоид, а также через сито.

Основная область применения магнитопорошковой дефектоскопии: полуфабрикаты; отливки, прокат; заготовки; детали, бывшие в эксплуатации; сварные швы. Выявляемые дефекты: трещины, включения, расслоения, несплавления, пористость и т. д. Магнитопорошковый метод контроля включает следующие технологические операции: подготовку к контролю, намагничивание объекта, нанесение дефектоскопического материала на объект контроля, осмотр контролируемой поверхности и регистрацию индикаторных рисунков

дефектов, оценку результатов контроля и размагничивание объекта.

*Подготовка к контролю* должна включать подготовку объекта к операциям контроля, проверку работоспособности дефектоскопов, проверку качества дефектоскопических материалов.

*При подготовке объекта с контролируемой поверхностью* необходимо удалить продукты коррозии, остатки окалины, масляные загрязнения, а при необходимости и следы лакокрасочных покрытий. Если намагничивание производят циркулярно путём пропускания тока через объект, то места касания электродов с поверхностью объекта контроля должны быть тщательно очищены.

Проверку работоспособности дефектоскопов и качества дефектоскопических материалов осуществляют при помощи стандартных образцов предприятий, специально изготовленных или отобранных из числа забракованных деталей с дефектами, размеры которых соответствуют принятому условному уровню чувствительности.

**Уровни чувствительности.** При магнитопорошковой дефектоскопии (МПД) принято три условных уровня чувствительности: А, Б, В (таблица 9.1).

Таблица 9.1 – Уровни чувствительности

Условные уровни чувствительности	Минимальная ширина раскрытия дефекта, мкм	Минимальная длина дефекта, мм
А	2,0	0,5
Б	10,0	
В	25	

Уровни чувствительности называются условными, т. к. определены для дефектов в форме щели с параллельными стенками, перпендикулярными поверхности детали. Согласно ГОСТ 21105–87, условный уровень чувствительности А может быть достигнут при шероховатости поверхности  $R_a \leq 2,5$  мкм, а Б и В – при  $R_a \leq 10$  мкм.

**Способы магнитопорошкового контроля.** При МПД применяют способ остаточной намагниченности (СОН) и способ приложенного поля (СПП).

СОН применяют, если выполняются одновременно все условия:

- 1) материал объекта контроля имеет коэрцитивную силу более 1000А/м;
- 2) остаточную индукцию – не менее 0,5 Тл;
- 3) если при этом достигается требуемый условный уровень чувствительности;
- 4) если толщина немагнитного покрытия на поверхности объекта не превышает 30 мкм.

Возможность достижения требуемого условного уровня чувствительности определяется по графикам (рисунок 9.2).

С этой целью восстанавливают перпендикуляры из точек осей координат, соответствующих  $H_c$  и  $B_r$  материала объекта контроля. Если точка их пересечения лежит на кривой или выше кривой требуемого условного уровня чувствительности, то этот условный уровень чувствительности достижим.

В нашем случае достижимы уровни чувствительности Б и В.

Если установлено, что деталь можно контролировать СОН, то по таблицам



определяют режим, при котором объект намагничивается до технического насыщения (напряжённость поля, необходимая для получения  $Br_{\max}$ ).

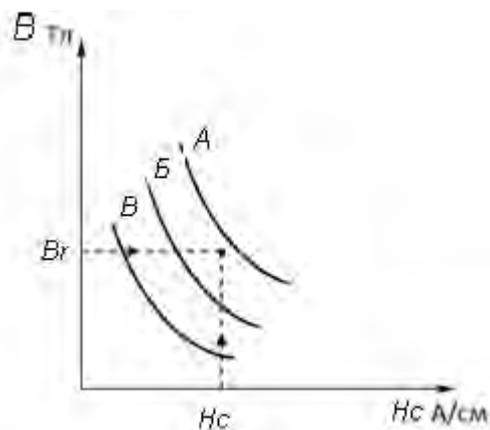


Рисунок 9.2 – Определение возможности достижения при контроле требуемого условного уровня чувствительности.

Если не выполняется хотя бы одно из перечисленных выше условий, то контроль производят СПП.

*Контроль СПП производят также в следующих случаях:*

- деталь изготовлена из магнитомягкого материала (сталь 10, 20 и др.);
- контролируемая деталь имеет сложную форму или малое удлинение (отношение  $l/d < 3...5$ );
- деталь контролируют с целью обнаружения поверхностных дефектов, расположенных на глубине более 0,01 мм или дефектов, находящихся под слоем немагнитного покрытия толщиной более 30 мкм;
- мощность дефектоскопа недостаточна для намагничивания всей детали вследствие больших её размеров;
- если контролируют небольшие участки крупногабаритного объекта с помощью переносных электромагнитов или постоянных магнитов.

Режим намагничивания при контроле СПП определяют по графикам (рисунок 9.3).

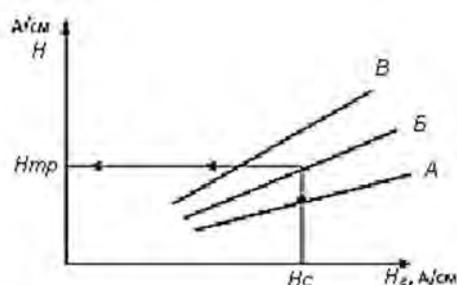


Рисунок 9.3 – Определение режима намагничивания при контроле способом приложенного поля

Если на поверхности контролируемого объекта имеется немагнитное покрытие толщиной более 20 мкм, то режим намагничивания следует

увеличить в  $k$  раз в соответствии с графиком (рисунок 9.4).

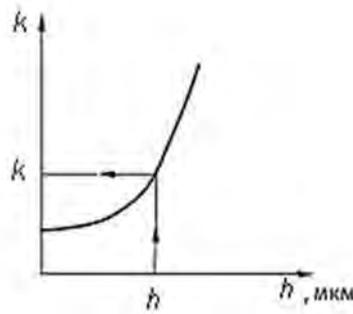


Рисунок 9.4 – Определение коэффициента увеличения режима намагничивания из-за наличия немагнитного покрытия на поверхности объекта

При контроле СОН объект предварительно намагничивают, а затем после снятия намагничивающего поля на его поверхность наносят дефектоскопический материал. Промежуток времени между указанными операциями не должен превышать часа.

При контроле СПП операции намагничивания объекта контроля и нанесения дефектоскопического материала выполняют одновременно.

При выборе способа МПД руководствуются следующими аргументами:

- контроль в приложенном поле позволяет достичь более высокой индукции в объекте и, как следствие, более высокой чувствительности обнаружения дефектов (за исключением случаев контроля деталей с выраженной текстурой, когда магнитный порошок осаждается по волокнам металла, а также объектов с грубой обработкой поверхности);

- способ контроля на остаточной намагниченности более прост в осуществлении: деталь можно расположить в удобном положении; дефектоскопический материал можно наносить как путём полива, так и путём погружения в ванну с суспензией; проще расшифровывать индикаторные рисунки скоплений магнитного порошка (в меньшей степени частицы порошка осаждаются по рискам, наклёпу, в местах грубой обработки поверхности и т. д.);

- при контроле СОН меньше вероятность прижогов в местах контакта электродов с деталью.

Поэтому в равных условиях нужно отдавать предпочтение СОН.

## 10 Решение задач оптимизации вихретокового анализа

10.1 Напишите математическое выражение обобщенного параметра  $x_2$ , используемого при вихретоковом контроле. Определите размерность обобщенного параметра, производя действия над размерностями входящих в него величин.

$$\text{Указания} - x = R \sqrt{\omega \mu_a \sigma} = R \sqrt{2 \pi f \mu_r \mu_0 \sigma} .$$

10.2 Рассчитайте оптимальное значение частоты возбуждающего тока для измерения радиусов цилиндрических изделий методом вихретокового контроля

с использованием проходных вихретоковых преобразователей (ВТП). Данные для расчета содержатся в таблице 10.1.

Таблица 10.1 – Данные для расчета частоты возбуждающего тока

Вариант	$R_1$ , мм	$\sigma$ , МСм/м	$\mu_r$
1	4	6	10
2	6	8	5
3	5	4	15
4	7	7	7
5	6	8	6
6	4	14	4
7	10	2	5
8	6	3	11
9	4	5	9
10	5	10	5
11	3	2	27
12	4	3	17
13	4	5	11
14	5	4	13
15	4	3	18
16	5	2	30
17	6	6	8
18	4	30	2

*Указания* – Для наиболее качественного измерения  $R_1$  цилиндра необходимо, чтобы обобщенный параметр  $x$  был равен 5. В этом случае чувствительность  $S_{R1}$  максимальна. Отсюда рассчитывается оптимальная частота возбуждения  $f_{opt}$ . Выполним, например, расчет  $f_{opt}$  для медного цилиндрического образца  $R_1 = 5$  мм,  $\sigma = 54$  МСм/м,  $\mu_r = 1$ . Из выражения

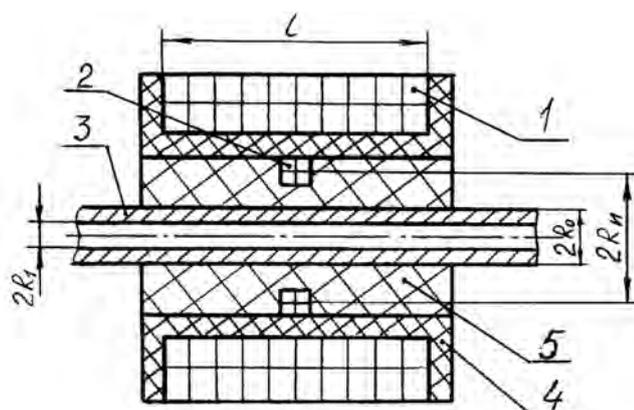
$$x = R_1 \sqrt{2\pi f \mu_r \mu_0 \sigma}$$

имеем

$$f = \frac{x^2}{R_1^2 2\pi \mu_r \mu_0 \sigma} = \frac{5^2}{(5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2\pi \cdot 1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 54 \cdot 10^6} = 2350 \text{ Гц.}$$

10.3 Пруток круглого сечения, изготовленный из материала с удельной электрической проводимостью  $\sigma$ , находится в поле соленоида (рисунок 10.1), питаемого переменным током частотой  $f$ . Постройте график распределения напряженности поля по сечению прутка, если напряженность поля на его поверхности  $H_0$ . В расчетах принять абсолютную магнитную проницаемость материала  $\mu_\alpha = \text{const}$ . Сделайте выводы. Исходные данные содержатся в таблице 10.2.





1 – возбуждающая обмотка; 2 – измерительная обмотка; 3 – объект контроля; 4 – каркас возбуждающей обмотки; 5 – каркас измерительной обмотки

Рисунок 10.1– Проходной трансформаторный вихретоковый преобразователь

Таблица 10.2 – Исходные данные для расчета

Вариант	$H_0, 10^2 \cdot \text{А/м}$	$r, 10^{-3} \cdot \text{м}$	$f, \text{Гц}$	$\sigma, 10^7 \cdot \text{См/м}$	$\mu_r$
1	80	8	100	1,0	150
2	100	9	50	1,2	200
3	150	10	60	1,3	800
4	60	11	80	2,0	1200
5	120	12	120	5,0	220
6	160	6	130	7,0	400
7	50	7	140	0,7	550
8	40	8	150	2,5	600
9	75	9	50	3,0	400
10	200	10	25	4,0	300
11	210	11	40	3,5	250
12	110	12	50	1,5	260
13	60	3	100	2,5	280
14	45	14	120	3,0	320
15	145	15	60	1,5	400
16	120	6	65	1,2	350
17	90	7	50	1,4	200
18	55	8	100	2,8	600

Указания – напряженность поля  $H_i$  в произвольной точке  $A$  в теле прутка на расстоянии  $r_i$  от его оси определяется из выражения

$$H_i = H_0 \frac{J_0(kr_i)}{J_0(kr_0)},$$

где  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка первого рода;

$k$  – коэффициент,  $k = \sqrt{2\pi f \mu_a \sigma}$ ;

$r_0$  – радиус прутка, м;

$r_i$  – расстояние от  $i$ -й точки до оси прутка.

Числовые значения функций  $J_0(kr)$  и  $J_0(kr_0)$  в зависимости от значений их аргументов могут быть определены с помощью таблицы 10.3.

Таблица 10.3 – Значения функции  $J_0(kr)$  при различных  $kr$

$kr$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	
$J_0(kr)$	1,00	1,00	1,02	1,08	1,23	1,51	1,95	2,58	
$kr$	4	4,5	5	5,5	6	6,5	8	9	10
$J_0(kr)$	3,44	4,62	6,27	8,46	11,5	21,5	40,8	77,9	150

**Пример** – Напряженность поля на поверхности прутка  $H_0 = 10^7$  А/м, радиус прутка  $r_0 = 8 \cdot 10^{-3}$  м,  $f = 50$  Гц,  $\sigma = 10^7$  См/м,  $\mu_r = 200$ . Определить напряженность поля на расстоянии  $r_i = 6 \cdot 10^{-3}$  м от оси прутка.

*Решение*

$$k = \sqrt{2\pi f \mu_a \sigma} = \sqrt{2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \cdot 10^7} = 888 \text{ м}^{-1}.$$

$$kr_0 = 888 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 7,09; \quad kr_i = 888 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 5,33.$$

С помощью таблицы 10.3, пользуясь методом интерполяции, получаем:

$$J_0(kr_0) = J_0(7,09) = 22,1; \quad J_0(kr_i) = J_0(5,33) = 7,2;$$

$$H_i = H_0 \frac{J_0(kr_i)}{J_0(kr_0)} = 10^4 \cdot \frac{7,2}{22,1} = 3258 \text{ А/м.}$$

## 11 Использование годографов ЭДС измерительной обмотки вихретокового преобразователя для определения условий контроля

### Задание 1

Рассчитайте оптимальную частоту возбуждения накладного параметрического ВТП (рисунок 11.1) для контроля электропроводности в интервале значений от 1,0 до 50 МСм/м, а также вносимое сопротивление преобразователя при взаимодействии ВТП с полупространством с удельной электрической проводимостью  $\sigma = 50$  МСм/м при  $f_{opt}$  (таблица 11.1). Необходимые для расчета зависимости изображены на рисунках 11.2 и 11.3.



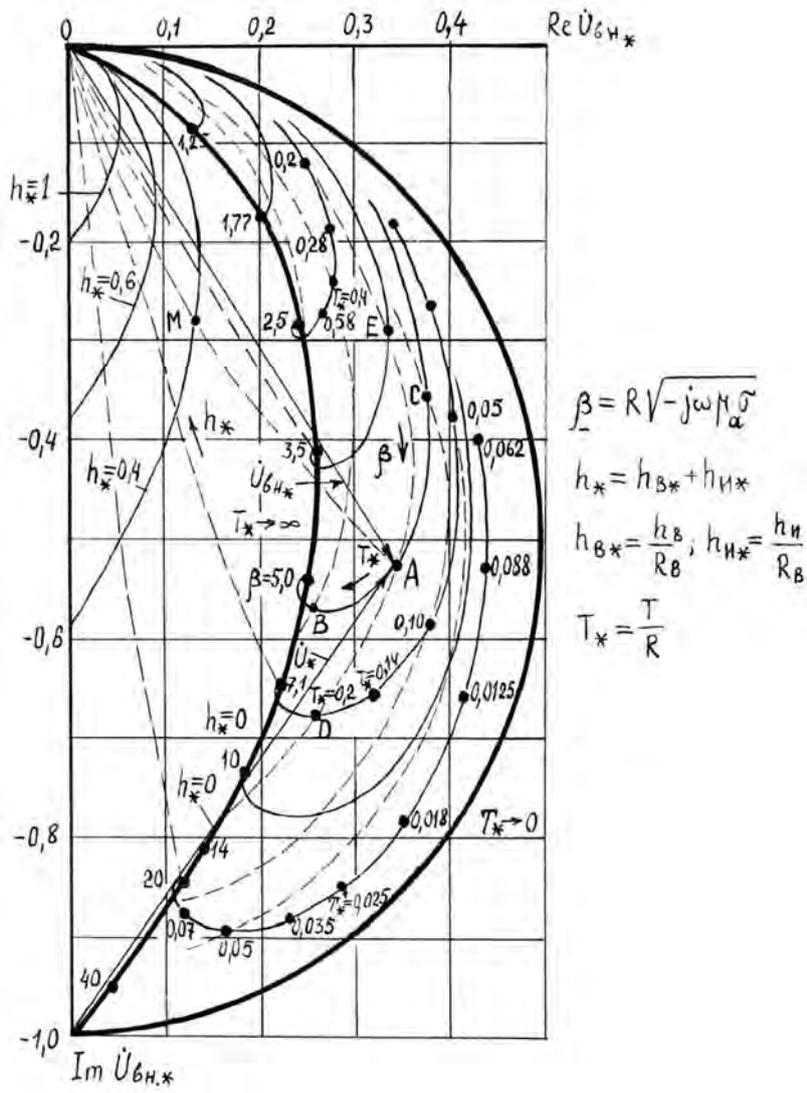


Рисунок 11.1 – Годографы относительного вносимого комплексного напряжения  $\dot{U}_{6H*}$  накладного вихретокового преобразователя при контроле неферромагнитного листа

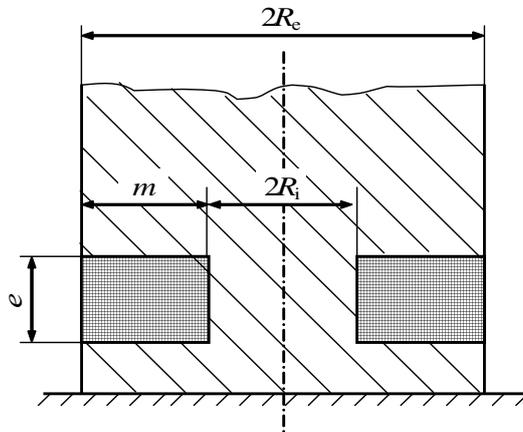


Рисунок 11.2 – Накладной параметрический преобразователь



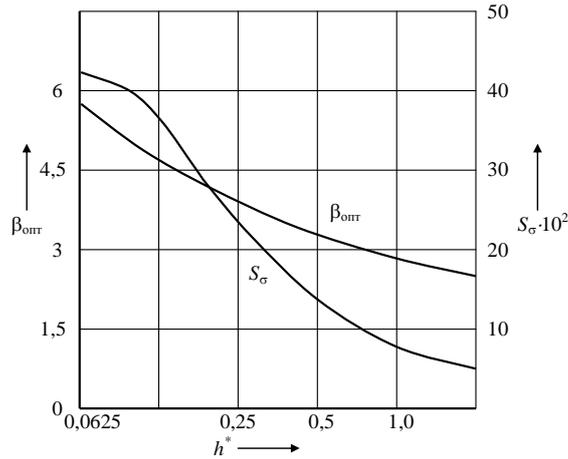


Рисунок 11.3 – Зависимость  $\beta_{opt}$  и  $S_\sigma$  от относительной высоты  $h^*$  расположения преобразователя над контролируемой поверхностью

Таблица 11.1 – Данные для расчета частоты возбуждения накладного параметрического ВТП

Вариант	$h_0$ , мм	$l$ , мм	$2R_u$ , мм	$2R_e$ , мм	$W$
1	0,15	2,5	2,0	5,0	210
2	0,1	2,5	2,5	5,0	250
3	0,15	3,0	3,0	6,0	280
4	0,1	2,0	2,5	5,0	200
5	0,15	2,5	2,0	5,5	230
6	0,1	2,0	3,0	6,0	280
7	0,15	2,5	3,0	5,5	300
8	0,1	2,0	3,0	5,5	250
9	0,1	2,5	2,5	6,0	280
10	0,1	2,8	2,4	5,5	200
11	0,15	3,0	3,0	6,0	250
12	0,07	2,5	3,0	5,5	240
13	0,05	2,0	2,5	6,0	250
14	0,04	2,0	2,0	6,0	220
15	0,08	2,5	2,0	5,0	210
16	0,1	3,0	2,5	5,0	230
17	0,12	2,0	2,0	5,5	240
18	0,14	2,0	2,5	5,5	220

Указания – На рисунке 11.1 приведены годографы  $\dot{U}_{вн.*} = -\dot{E}_{вн.*}$  накладного ВТП в зависимости от обобщенного параметра контроля  $\beta = R\sqrt{-j\omega\mu_a\sigma}$  и от обобщенного зазора  $h^* = h_e^* + h_u^*$  для случая контроля неферромагнитного листа с относительной толщиной  $T^* = T/R$ , где  $R$  – большее из значений  $R_e$  и  $R_u$ .

$$R_e = \frac{R_{Be} + R_{Bi}}{2}; \quad R_u = \frac{R_{ue} + R_{ui}}{2}; \quad h_{e*} = \frac{h_B}{R_B}; \quad h_{u*} = \frac{h_u}{R_e}.$$

Жирной линией выделен годограф  $\dot{U}_{вн.*}(\beta)$ , соответствующий полупространству ( $T^* \rightarrow \infty$ ) при  $h^* \rightarrow 0$ . Как показано из рисунка 11.1,  $U_{вн.*} = |\dot{U}_{вн.*}|$  резко убывает при увеличении  $h^*$  по закону, близкому к экспоненциальному. Годограф  $\dot{U}_{вн.*}(\beta)$  переходит в полуокружность радиусом 0,5 при  $T \rightarrow 0$ .

Рассмотрим пример определения выходного напряжения ВТП с помощью годографа (см. рисунок 11.1). Допустим, что накладной ВТП используется для контроля листа с параметрами:  $\sigma = 31$  МСм/м;  $T = 2$  мм;  $\mu_r = 1$ . Параметры преобразователя:  $R_e = 10$  мм;  $R_u = 8$  мм. Режим контроля: частота  $f = 1$  кГц; зазор между преобразователем и листом  $h^* = h_u^* + h_e^*$ .

Обобщенные параметры контроля

$$\beta = R\sqrt{\omega\mu_a\sigma} = 10^{-2}\sqrt{2\pi \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 31 \cdot 10^6} \approx 5; \quad T^* = T/R = 0,2; \quad h^* \approx \frac{2h_e}{R_e} \rightarrow 0.$$

С помощью годографа находим точку  $A$ :

$$\dot{U}_{вн.*} = 0,34 - j0,53.$$

При увеличении толщины листа до 4 мм конец вектора  $\dot{U}_{вн.*}$  перемещается в точку  $B$  ( $T^* = 0,4$ ). С увеличением  $\sigma$  до 62 МСм/м конец вектора  $\dot{U}_{вн.*}$  перемещается в точку  $D$  ( $\beta$  увеличивается в  $\sqrt{2}$  раз), а при уменьшении до 15 МСм/м – в точку  $E$  ( $\beta$  уменьшается примерно в  $\sqrt{2}$  раз). При увеличении зазора до 2 мм конец вектора  $\dot{U}_{вн.*}$  перемещается в точку  $M$  ( $h^* = 0,4$ ).

**Пример** – Расчет оптимальной частоты возбуждения накладного параметрического вихретокового преобразователя выполним для следующего случая:  $2R_i = 2$  мм;  $2R_e = 5$  мм;  $h_0 = 0,15$  мм;  $l = 2$  мм;  $W_e = 200$ .

Рассчитаем относительную высоту расположения преобразователя над контролируемым полупространством:

$$h^* = \frac{h_0 + \frac{l}{2}}{R},$$

где  $R = R_{cp} \left( 1 + \frac{m^2}{24R_{cp}^2} \right);$

$$R_{cp} = \frac{R_e + R_i}{2}; \quad R_{cp} = \frac{2,5 + 1}{2} = 1,75 \text{ мм};$$

$$m = R_e - R_i = 1,5 \text{ мм}.$$



$$R = 1,75 \left( 1 + \frac{1,5^2}{24 \cdot 1,75^2} \right) = 1,8 \text{ мм}; \quad h^* = \frac{0,15 + \frac{2}{2}}{1,8} = 0,64.$$

Для полученного значения  $h^*$  по графику (см. рисунок 11.3) определяем  $\beta_{onm} = 3,5$ . Зная  $\beta_{onm}$ , по формуле  $\beta = R_0 \sqrt{2\pi f \mu_r \mu_0 \sigma}$  определяем  $f_{onm}$ . При этом  $\sigma \approx \sigma_{cp} = 25 \text{ МСм/м}$ .

$$f_{onm} = \frac{\beta^2}{R^2 2\pi \mu_r \mu_0 \sigma} = \frac{3,5^2}{(1,8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2\pi \cdot 1,4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 25 \cdot 10^6} = 19 \text{ кГц}.$$

Для расчета вносимого сопротивления  $\dot{Z}_{вн}$  преобразователя при его взаимодействии с медным полупространством с  $\sigma = 50 \text{ МСм/м}$  используем формулу  $\dot{Z}_{вн} = R_{вн} + jX_{вн}$ ,

$$R_{вн} = \frac{18 \cdot 10^{-7} \omega W_g R}{\beta^2} e^{-3h^*} (\sqrt{2} \sqrt{\sqrt{81 + 16\beta^4} + 9} - 6);$$

$$X_{вн} = \frac{6 \cdot 10^{-7} \omega W_g R}{\beta^2} e^{-3h^*} (4\beta^2 - 3\sqrt{2} \sqrt{\sqrt{81 + 16\beta^4} + 9}).$$

Тогда

$$R_{вн} = \frac{18 \cdot 10^{-7} \cdot 2\pi \cdot 19 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3}}{3,5^2} e^{-3 \cdot 0,64} \times$$

$$\times (\sqrt{2} \sqrt{\sqrt{81 + 16 \cdot 3,5^4} + 9} - 6) = 4,47 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

$$X_{вн} = \frac{6 \cdot 10^{-7} \cdot 2\pi \cdot 19 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3}}{3,5^2} e^{-3 \cdot 0,64} \times$$

$$\times (4 \cdot 3,5^2 - 3\sqrt{2} \sqrt{\sqrt{81 + 16 \cdot 3,5^4} + 9}) = 11,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

## 12 Решение задач измерения удельной электрической проводимости в объектах

Рассмотрим диаграммы чувствительности проходного ВТП к изменениям радиуса и удельной электрической проводимости цилиндра. Диаграммы построены для коэффициента заполнения  $\eta = 1$  и  $\mu_a = 1$ .

На рисунке 12.1, а показана диаграмма чувствительности проходного ВТП к изменениям радиуса немагнитного цилиндра. Из диаграммы следует, что при  $x = 0$  чувствительность к изменению радиуса  $\underline{S}_R = 0$ , при  $X \rightarrow \infty$   $\underline{S}_R \rightarrow -2$ , т. е. чувствительность проходного ВТП в пределе при максимальных частотах

стремится к постоянной величине 2.

Из диаграммы, представленной на рисунке 12.1, б, следует, что при  $x \rightarrow 0$   $\underline{S}_\sigma \rightarrow 0$ , при  $x \rightarrow \infty$   $\underline{S}_\sigma \rightarrow 0$ . Оптимальные условия имеют место при:  $4 \leq x^2 \leq 9$ , т. е. при  $4 \leq R^2 \omega \mu_a \sigma \leq 9$ .

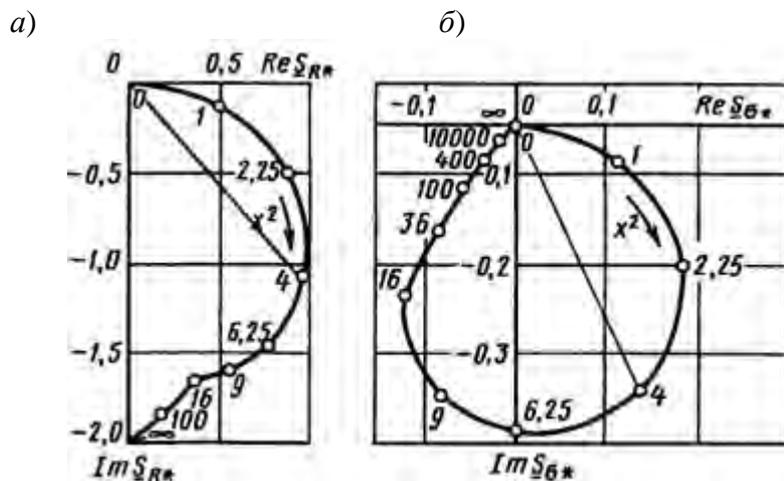


Рисунок 12.1 – Диаграммы чувствительности наружного проходного ВТП к изменениям радиуса (а) и удельной электрической проводимости (б) кругового цилиндра

### Задание

Определить оптимальный диапазон изменения и оптимальное значение частот ВТП при определении удельной электрической проводимости цилиндра  $\sigma = 6 \cdot 10^8$  См/м.

Таблица 12.1 – Данные для расчета частоты возбуждения накладного параметрического ВТП при определении удельной электрической проводимости  $\sigma$  объекта

Вариант	$R$ , мм	$\mu_a$ , Гн/м	$\sigma$ , См/м
1	5	1	$1 \cdot 10^6$
2	6		$2 \cdot 10^6$
3	7		$3 \cdot 10^6$
4	8		$3 \cdot 10^6$
5	9		$5 \cdot 10^6$
6	10		$6 \cdot 10^6$
7	11		$7 \cdot 10^7$
8	12		$8 \cdot 10^7$
9	13		$9 \cdot 10^7$
10	14		$1 \cdot 10^7$
11	15		$2 \cdot 10^7$
12	16		$3 \cdot 10^7$
13	17		$4 \cdot 10^7$
14	18		$5 \cdot 10^7$
15	19		$6 \cdot 10^7$
15	20		$7 \cdot 10^7$
17	21		$8 \cdot 10^7$
18	22		$8,5 \cdot 10^7$

## 13 Изучение принципов работы, калибровки и поверки ЯМР-томографов

### 13.1 Как работает аппарат МРТ (магнитно-резонансной томографии)

Одним из наиболее результативных способов медицинского обследования является МРТ, или магнитно-резонансная томография, дающая возможность получить наиболее точную информацию об особенностях анатомии человеческого организма, эндокринной системы, возбудимости тканей, а также внутренних органов. Возможность определения локализации процесса и объема произошедших повреждений становится основным преимуществом процедуры МРТ при обнаружении злокачественных опухолей и обследования сосудов.

Магнитно-резонансная томография – это исключительный шанс получить точнейшие послойные изображения области организма, которая исследуется. Процедура осуществляется посредством специализированного устройства, влияние которого на человеческий организм заключается в возбуждении электромагнитных волн, образовании сильного магнитного поля и фиксации обратного электромагнитного сигнала от человеческого организма. Итогом является построение изображения путем обработки поступающего сигнала на компьютер.

Магнитно-резонансный томограф является аппаратом, дающим возможность достичь эффективнейшего диагностирования, определить метаморфозы в функционировании организма и получить высочайшее по точности изображение изучаемых органов, которое дает результаты на порядок выше, нежели рентгеновский метод, компьютерная томография или УЗИ. Магнитно-резонансная томография дает возможность обнаружить онкологические заболевания и перечень других не менее опасных болезней, а также замерить быстроту кровотока и течение спинномозговой жидкости.

За основу функционирования МРТ взят метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР), сущность которого будет изложена ниже. Томограф создает условия для возникновения сильнейшего магнитного поля. Существенным фактором, поясняющим суть работы томографа, является присутствие в организме человека протонов. Аппарат МРТ создает однородное магнитное поле в теле человека при его размещении внутри устройства.

Итоговое изображение – это совсем не фотография или фото-негатив изучаемой части тела или органа. Радиосигналы преобразовываются в высококачественное изображение среза человеческого организма на экране монитора. Доктора видят органы в разрезе. Магнитно-резонансная томография является более точным и надежным методом диагностирования, нежели компьютерная томография (КТ), ведь при МРТ не применяют ионизирующего излучения, а применяют абсолютно безвредные для организма электромагнитные волны.

### 13.2 Пояснение метода ЯМР

Известно, что многие атомные ядра имеют собственный момент количества движения (спин), обусловленный их вращением. Поскольку ядра

имеют электрический заряд, то спину соответствует кольцевой ток, протекающий вокруг оси вращения и создающий слабое магнитное поле. Следовательно, каждое ядро с ненулевым спином имеет собственный магнитный момент, т. е. является магнитным диполем. Такие ядра могут проявлять эффект ЯМР.

**Стационарный метод ЯМР.** В общем случае магнитные диполи ядер ориентированы хаотически.

В присутствии внешнего поля  $H_0$  магнитные моменты ядер с ненулевым спином ориентируются вдоль направления поля. В образце образуется результирующий магнитный момент, направленный вдоль  $\bar{H}_0$ . Вектор  $\bar{M}$  можно заставить прецессировать вокруг направления поля  $\bar{H}_0$  подобно падающему волчку (гироскопу).

Это достигается наложением второго поля  $H_1$  высокой частоты (обычно радиочастоты) в направлении, перпендикулярном полю  $\bar{H}_0$ .

Дополнительное поле  $H_1$  может быть создано окружающей образец катушкой, соединенной с радиочастотным генератором. Вектор  $\bar{M}$  отклоняется от направления  $Z$  и прецессирует вокруг него лишь при условии воздействия поля  $H_1$ , частота которого  $\omega$  совпадает с естественной (ларморовой) частотой  $\omega_0$  ядер. Резонансная частота связана с напряженностью постоянного поля соотношением

$$\omega_0 = \gamma H_0,$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение (отношение магнитного момента  $M_1$  частицы к ее механическому моменту количества движения  $mvR$ ).

Угол прецессии непрерывно изменяется. Путем подбора частоты поля можно настроиться на данный, интересующий нас тип ядер, и наблюдать соответствующий им сигнал ЯМР. Сигнал ЯМР можно снимать либо с той же высокочастотной катушки, либо с дополнительной измерительной обмотки. В зависимости от пространственного расположения ядер (атомов) в молекулах анализируемого вещества, характера их взаимодействия вид сигнала изменяется. С помощью ЭВМ из сигнала извлекается необходимая информация о структуре молекул вещества.

**Импульсный метод ЯМР.** В импульсном методе ЯМР сигнал ЯМР наблюдается не в процессе подачи радиочастотной энергии поля  $H_1$ , а с момента отключения импульса радиочастотного поля  $H_1$ . В зависимости от мощности и длительности импульса высокочастотного поля можно достичь любого угла процессии  $\alpha$  вектора  $M$ . Частота процессии при этом, естественно, равна  $\omega$ , т. к. определяется природой ядер и полем  $H_0$ .

Сразу же после прекращения действия высокочастотного поля  $H_1$  вектор  $\bar{M}$  постепенно возвращается в исходное положение, параллельное оси  $z$ . Приемная катушка при импульсном методе ЯМР принимает сигнал, обусловленный возвращением прецессирующего вектора  $\bar{M}$  в положение, параллельное оси  $Z$  (рисунок 13.3).



Представленный на рисунке сигнал затем с помощью Фурье-преобразования (математической операции, преобразующей зависимость амплитуды сигнала от времени в ее зависимость от частоты) трансформируется в вид сигнала, полученного и при стационарном методе ЯМР (рисунок 13.4).



Рисунок 13.3 – Характер изменения сигнала, обусловленного возвращением прецессирующего вектора  $\vec{M}$  в положение, параллельное оси Z

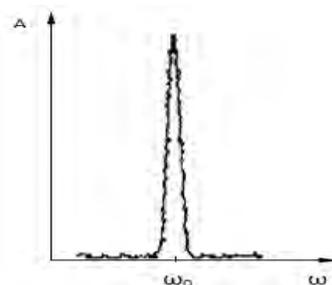


Рисунок 13.4 – Зависимость амплитуды сигнала ЯМР от частоты

**ЯМР-интроскопия.** С помощью ЯМР можно получать изображения поперечных сечений (срезов) различных объектов. Приборы для ЯМР-интроскопии весьма дорогостоящие и нашли пока применение только в медицине, в частности в онкологии. Методы формирования ЯМР изображения требуют пространственного кодирования сигналов ЯМР. Основой является импульсный метод ЯМР. В качестве примера рассмотрим методику получения изображений двух различных по размерам пробирок с водой.

На рисунке 13.5, *а* представлена последовательность получения сигнала ЯМР импульсным методом (описано выше). Если же на объект кроме однородного постоянного поля  $H_0$  наложить линейный градиент  $G$  постоянного поля (на рисунке 13.5, *б* не показано), то разные точки объекта будут находиться в поле различной напряженности и их резонансные частоты будут отличаться. Спад амплитуды сигнала будет иным, чем при импульсном методе ЯМР (двугорбая кривая) (см. рисунок 13.5, *б*).

После Фурье-преобразования появляется сигнал ЯМР, отражающий форму образца (см. рисунок 13.5, *б*).

При формировании изображения по проекциям градиент напряженности поля  $G$  вращается для получения моментальных снимков образцов под различными углами (рисунок 13.6). Из большого количества сигналов ЭВМ может построить изображение поперечных сечений образцов.

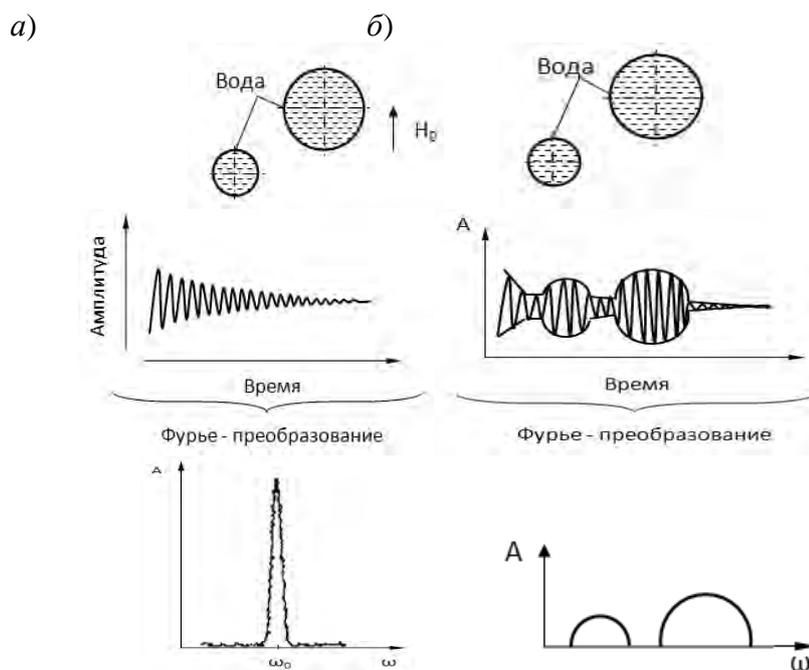


Рисунок 13.5 – Последовательность получения сигнала ЯМР импульсным методом (а) и при наложении на объект, кроме постоянного поля  $H_0$ , линейного градиента  $G$  постоянного поля (б)

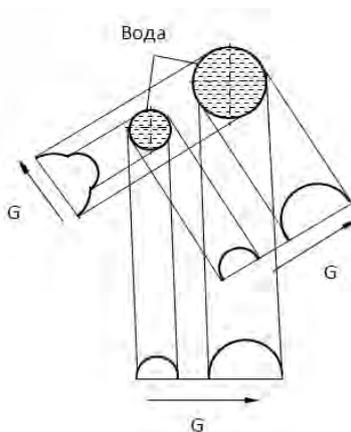


Рисунок 13.6 – Получение изображения объекта по проекциям

### 13.3 Устройство магнитно-резонансного томографа (МРТ)

Современный аппарат МРТ состоит из магнита, электрической катушки, генератора радиоимпульсов, клетки Фарадея, источника питания, охлаждающая системы, устройства обработки информации.

Рассмотрим подробнее отдельные элементы аппарата МРТ.

Электромагнит или постоянный магнит создает стабилизированное поле, которое характеризуется высокой однородностью и напряженностью. Важным показателем является мощность устройства. Именно от мощности зависит качество изображений срезов объекта.

МРТ-томографы делятся на четыре группы:

- 1) низкочастотные – магнитная индукция поля менее 0,5 Тл;
- 2) среднечастотные – магнитная индукция от 0,5...1 Тл;

3) высокопольные – характеризуются высокой скоростью обследования, хорошо просматриваемой визуализацией, даже если человек двигался при процедуре. Магнитная индукция – 1...2 Тл;

4) сверхвысокопольные – более 2 Тл.

Имеются следующие разновидности магнитов, применяемых в МРТ-томографах.

Постоянный магнит – производится из специальных сплавов. Достоинствами этих магнитов является то, что их не нужно охлаждать. Недостатки – большая масса и невысокая напряженность поля, создаваемого ими. Кроме того, такие магниты чувствительны к изменениям температур.

Сверхпроводимые магниты. Материал их катушек создан из особого сплава. Через такие катушки пропускают огромные токи. Благодаря аппаратам с подобными катушками в них создается сильное магнитное поле. Однако, в сравнении с постоянным магнитом, для сверхпроводимого магнита необходима система охлаждения. Недостатками являются значительный расход жидкого гелия при небольших затратах энергии, внушительные затраты на эксплуатацию агрегата, необходимость его экранирования. Кроме того, существует риск выброса жидкости для охлаждения при утрате сверхпроводящих свойств.

Резистивный магнит не нуждается в применении специализированных систем охлаждения и может производить относительно однородное поле для осуществления сложных испытаний. Недостатком является большая масса, около пяти тонн, увеличивающаяся в случае экранирования. Генератор создает радиочастотное поле прямоугольной и сложной формы. Это приводит к возбуждению ядер, позволяет улучшить контрастность изображения, получаемого в результате обработки данных.

Приемник – это усилитель сигнала высочайшей чувствительности с незначительным шумом. Он работает на сверхвысоких частотах. На разрешающую способность влияют датчики регистрации, расположенные около изучаемого объекта. Процедура МРТ не представляет никакой опасности для человека.

Для повышения качества визуализации исследуемому человеку могут ввести вещество контрастного типа на основе Gadolinium, которое не обладает побочными действиями. Вводится вещество при помощи шприца. В этом случае автоматически подсчитывают необходимую дозу и быстроту введения препарата. Средство поступает в организм синхронно с протекающей процедурой.

Преимущества МРТ:

- высочайшая вероятность получить наиболее точную визуализацию исследуемой части тела или органа;
- постоянно развивающееся качество диагностирования;
- отсутствие негативных воздействий на человеческий организм.

Аппараты отличаются по напряженности генерируемого поля и «раскрытости» рабочей зоны магнита. Чем выше мощность, тем скорее проводится исследование и тем лучше качество визуализации.

Открытые аппараты имеют С-образную форму и считаются наилучшими для обследования людей, подверженных тяжелым формам клаустрофобии. Изначально они разрабатывались для осуществления вспомогательных внутри-



магнитных процедур. Также стоит отметить, что эта разновидность устройства существенно менее эффективна, нежели закрытый аппарат.

Обследование с помощью МРТ – одно из наиболее результативных и безопасных методов диагностирования и максимально информативно для подробного изучения спинного и головного мозга, позвоночника, органов брюшной полости и малого таза.

### ***13.4 Калибровка и поверка МРТ-томографов***

Калибровка средств измерений – совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений. Определение аналогично поверке, от которой калибровку отличает то, что она распространяется на средства измерений, которые не подлежат государственному метрологическому контролю и надзору, т. е. поверке. Калибровка объединяет функции, выполнявшиеся ранее при метрологической аттестации и ведомственной поверке средств измерений. Если поверка является обязательной операцией, контролируемой органами Государственной метрологической службы, то калибровка – это добровольная функция, выполняемая либо метрологической службой предприятия, либо по его заявке любой другой организацией, способной выполнить работу.

Таким образом, поверка средств измерений – совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами, организациями) с целью определения и подтверждения соответствия средства измерений установленным техническим требованиям.

Средства измерений, не подлежащие поверке, могут подвергаться калибровке при выпуске из производства или ремонта, при ввозе по импорту, при эксплуатации, прокате и продаже.

Калибровка средств измерений производится метрологическими службами юридических лиц с использованием эталонов, соподчиненных государственным эталонам единиц величин.

Результаты калибровки средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средства измерений, или сертификатом о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах.

Калибровку и поверку МРТ-томографов производят на моделях-манекенах, содержащих модели человеческих органов. Причем их характеристики максимально приближены к характеристикам соответствующих человеческих органов.

#### **Задание**

Описать физические принципы, положенные в основу магнитно-резонансного томографа.



## 14 Защита от вредного воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей на человека

Явление затухания электромагнитной волны в поверхностном слое металла используют для *экранирования от переменного поля*. Электромагнитные экраны представляют собой полые цилиндрические, сферические или прямоугольные оболочки, внутрь которых помещают экранируемое устройство (например, катушку индуктивности, измерительный прибор и т. д.).

Экран используют для защиты объекта, помещенного в экран, от влияния внешнего электромагнитного поля, либо для защиты внешнего по отношению к экрану пространства от электромагнитного поля, создаваемого устройством, заключенным в экране.

Поскольку на расстоянии, равном длине волны, электромагнитная волна полностью затухает, то для хорошего экранирования толщина стенки экрана должна быть примерно равна длине волны в металле. Экранирование от переменного электромагнитного поля основано главным образом на том, что электромагнитная волна, проникающая в стенки экрана, быстро затухает, расходуя энергию на покрытие потерь, обусловленных вихревыми токами в стенках экрана.

Если экран выполнен из ферромагнитного материала и частота  $\omega$  относительно низкая, то экранирование достигается не только за счет затухания волны в стенке экрана, но и за счет стремления силовых линий магнитного поля пройти по участкам с меньшим магнитным сопротивлением. На практике приходится учитывать и другие факторы: механическую прочность экрана, его стоимость и т. д.

*Экранирование от электростатического поля* основано на компенсации внешнего поля полем зарядов, образовавшихся на стенках экрана из проводящего материала вследствие электростатической индукции. Объясняется это тем, что в проводящем теле, находящемся в электростатическом поле, происходит разделение зарядов. Отрицательные заряды смещаются на поверхность тела, обращенную в сторону более высокого потенциала, положительные – в противоположную сторону. Все точки тела будут иметь одинаковый потенциал. Если бы между какими-либо точками возникла разность потенциалов, то под ее действием появилось бы упорядоченное движение зарядов, что противоречит понятию электростатического поля. Поверхность тела эквипотенциальна. Вектор напряженности внешнего поля в любой точке поверхности подходит к ней под прямым углом. Внутри проводящего тела напряженность поля равна нулю, т. к. внешнее поле компенсируется полем зарядов, расположенных на поверхности тела. Толщина стенок экрана при электростатическом экранировании, в отличие от экранирования в магнитном и электромагнитном полях, может быть сколь угодно малой.

*Экранирование от постоянного магнитного поля* основано на том, что силовые линии магнитного поля проходят преимущественно по участкам с меньшим магнитным сопротивлением. То есть если в постоянном магнитом



поле находятся толстостенная шаровая оболочка или толстостенный цилиндр, продольная ось которого перпендикулярна направлению поля, то напряженность поля внутри этих объектов близка к нулю, т. к. силовые линии поля проходят в основном внутри металла.

### **Задание**

Выполнить расчет защитных экранов, используя методики, описанные в [2].

## **Список литературы**

1 Приборы и методы электромагнитного контроля : методические указания к курсовому проекту / Сост. В. А. Новиков. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2013. – 29 с.

2 Электромагнитные аппараты и системы : методические рекомендации к курсовой работе для студентов направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» дневной формы обучения / Сост. В. А. Новиков. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 21 с.

