

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
12.03.01 «Приборостроение»
дневной формы обучения*



Могилев 2022

УДК 620.179.14
ББК 31. 222
П75

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «14» декабря 2021 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 «Приборы и системы электромагнитного контроля», методические указания по их выполнению, используемая литература.

Учебно-методическое издание

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	А. А. Подошевка
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 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07. 03. 2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

Введение.....	4
1 Размерности магнитных и электрических величин. Действия над размерностями	5
2 Расчет магнитостатических полей дефектов.....	6
3 Методика магнитопорошкового контроля	12
4 Определение оптимального режима намагничивания при контроле ферромагнитных изделий с использованием программного продукта пакета ANSYS Academic Research EM.....	14
5 Расчет электромагнита для намагничивания постоянным полем изделий в процессе магнитного контроля	16
6 Вопросы и задачи практических занятий вихретокового контроля	21
Список литературы	30
Приложение А	31

Введение

Целью преподавания дисциплины «Приборы и системы электромагнитного контроля» является ознакомление студентов с физикой магнитных, электрических и электромагнитных явлений, принципами построения приборов и устройств, основанных на регистрации магнитных, электрических и электромагнитных полей, с методическими вопросами их применения для дефектоскопии, измерения геометрических параметров, контроля физико-механических свойств и структуры материалов и изделий.

В связи с этим настоящие методические рекомендации содержат такие важные вопросы, как размерности магнитных и электрических величин, действия над размерностями; расчет поля дефекта, эквивалентного точечному, линейному и ленточному магнитному диполю, поля внутреннего дефекта; определение оптимального режима при магнитографическом контроле; расчет электромагнита намагничивающего устройства; выбор типа магнитной ленты; решение задач оптимизации вихретокового анализа с использованием проходных и накладных преобразователей.

В методических рекомендациях приведены задания для практических занятий по дисциплине, указания по их выполнению, используемая литература.

Настоящие методические рекомендации позволят учащимся более глубоко усвоить дисциплину «Приборы и системы электромагнитного контроля».

1 Размерности магнитных и электрических величин. Действия над размерностями

Задачи и контрольные вопросы [1]

1 Назовите единицы измерения B , μ_a , μ_0 , μ_d , Φ , H , M , C .

2 Среди написанных выражений укажите верные:

а) Дж = В·с, Дж = Ом·с, Дж = В·А·с;

б) Гн = В·с, Гн = Ом·с, Гн = В·А·с;

в) Вб = В·с, Вб = Ом·с, Вб = В·А·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 $\frac{[H]}{[A] \cdot [M]} = \frac{[Вб]}{[M]^2} = [Тл]$.

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, μ_0 – магнитная постоянная, S – сечение полюса.

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

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 $\frac{\frac{[Кл]^2}{[H] \cdot [M]^2} \cdot [M]^2}{[M]} = \frac{[Кл]}{[В]} = [ф]$;

7 Покажите, что $\frac{[Вб] \cdot [Гн] \cdot [Н] \cdot [с]^2}{[А] \cdot [В] \cdot [с] \cdot [Ом] \cdot [кг] \cdot [М]} = \frac{[с]}{[А]}$; $\frac{[Кл] \cdot [В]}{[А]^2 \cdot [Ом] \cdot [с]} = 1$;

$\frac{[Н]}{[А]^2} = \frac{[Гн]}{[М]}$; $\frac{[Кл]^2}{[Н] \cdot [М]^2} = \frac{[Ф]}{[М]}$; $[Тл] = \frac{[Гн] \cdot [А]}{[М]^2}$; $\frac{[Гн]}{[М]} = \frac{[Тл] \cdot [М]}{[А]}$.

2 Расчет магнитостатических полей дефектов

2.1 Расчет магнитостатических 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

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

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.

Задание 1

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

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

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

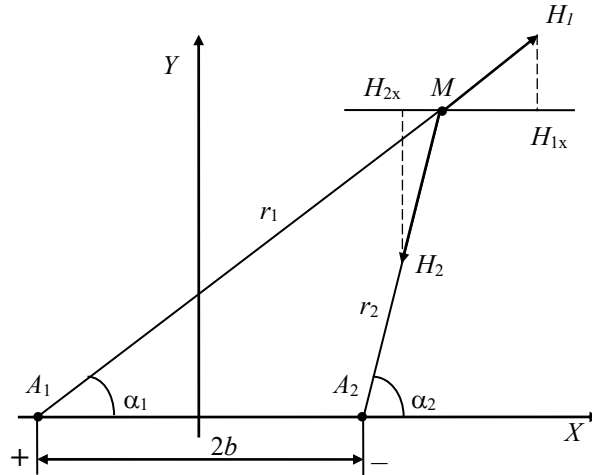


Рисунок 2.1 – Расчет магнитного поля дефекта, эквивалентного точечному и линейному диполям

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

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

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

Задание 2

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

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

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

2.1.4 Топография поля дефекта, эквивалентного ленточному диполю.

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 2.2) 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» $\sigma(\eta)$.

$$dQ = \sigma(\eta) dS_n, \quad (2.7)$$

где η изменяется в пределах от 0 до h .

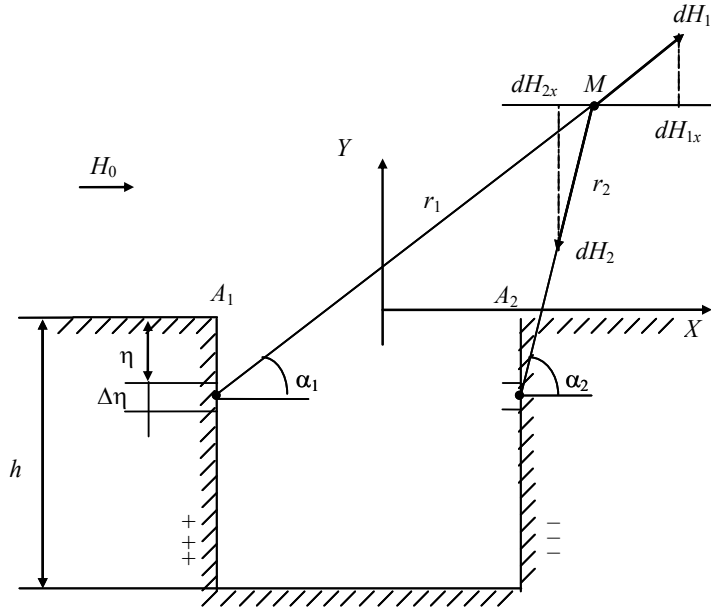


Рисунок 2.2 – Расчет магнитного поля дефекта, эквивалентного ленточному диполю

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:

$$d\bar{H}_1 = \frac{2 \cdot \sigma(\eta) dS_n}{r_1^2}. \quad (2.8)$$

Принимая во внимание, что

$$\cos \theta_1 = \frac{x+b}{r_1}; \quad \sin \theta_1 = \frac{y+\eta}{r_1}; \quad \cos \theta_2 = \frac{x-b}{r_2}; \quad \sin \theta_2 = \frac{y+\eta}{r_2};$$

$$r_1^2 = (x+b)^2 + (y+\eta)^2; \quad r_2^2 = (x-b)^2 + (y+\eta)^2,$$

получим

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

Составляющие поля от отрицательно «заряженной» грани:

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

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

$$H_x = 2 \cdot \sigma_n \cdot \left(\arctg \frac{h \cdot (x+b)}{(x+b)^2 + y \cdot (y+h)} - \arctg \frac{h \cdot (x-b)}{(x-b)^2 + y \cdot (y+h)} \right); \quad (2.9)$$

$$H_y = 2 \cdot \sigma_n \cdot \ln \frac{\left((x+b)^2 + (y+h)^2 \right) \cdot \left((x-b)^2 + y^2 \right)}{\left((x+b)^2 + y^2 \right) \cdot \left((x-b)^2 + (y+h)^2 \right)}. \quad (2.10)$$

Задание 3

Выполнить расчет тангенциальной $\frac{H_x}{\sigma_n}$ и нормальной $\frac{H_y}{\sigma_n}$ составляющих

магнитного поля на поверхности пластины. Поле создается магнитными полюсами, возникающими на боковых гранях подкладки, уложенной на поверхность пластины толщиной s с обратной ее стороны. Подкладка имеет ширину l и толщину δ , 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 2.1.

Таблица 2.1 – Данные для расчета

Номер варианта	s , мм	l , мм	δ , 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

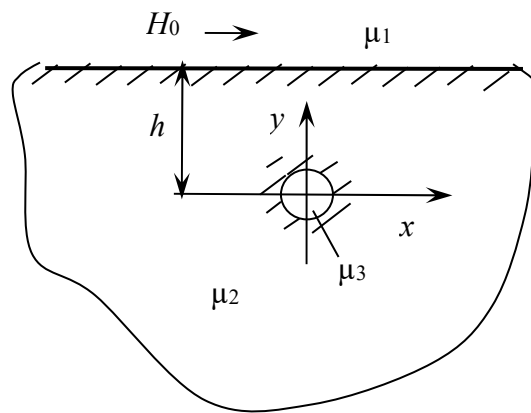
Окончание таблицы 2.1

Номер варианта	s , мм	l , мм	δ , мм
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

2.2 Расчет магнитостатических полей внутренних несплошностей

2.2.1 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 2.3.



μ_1 – магнитная проницаемость воздуха; μ_2 – магнитная проницаемость материала объекта; μ_3 – магнитная проницаемость материала дефекта

Рисунок 2.3 – Расчетная схема

Получены математические выражения для составляющих напряженности поля рассеяния дефекта, ориентированных перпендикулярно и параллельно поверхности объекта:

$$H_{dx} = -\frac{2\mu_2(\mu_2 - \mu_1)r^2 H_0}{(\mu_2 + 1)(\mu_2 + \mu_3) - (\mu_2 - 1)(\mu_2 - \mu_3)(r/h)^2} \cdot \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2}; \quad y \geq b; \quad (2.11)$$

$$H_{dy} = -\frac{2\mu_2(\mu_2 - \mu_3)r^2H_0}{(\mu_2 + 1)(\mu_2 + \mu_3) - (\mu_2 - 1)(\mu_2 - \mu_3)(r/h)^2} \cdot \frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2}; y \geq b. \quad (2.12)$$

Задание 4

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.

2.2.2 Расчет составляющих поля рассеяния внутреннего дефекта на поверхности полубесконечного тела.

Задание 5

Определить характер изменения тангенциальной H_x и нормальной H_y составляющих магнитостатического поля внутренней цилиндрической несплошности в воздухе на расстоянии Δ от поверхности полубесконечного ферромагнитного тела, если магнитная проницаемость окружающей среды μ_1 , материала объекта контроля μ_2 и дефекта μ_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 2.3 содержатся в таблице 2.2.

В системе координат, выбранной согласно рисунку 2.3, составляющие поля цилиндрической несплошности в полубесконечном теле (без учета влияния границы раздела сред) определяются из выражений (2.11) и (2.12).

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

$$H_x = -\frac{2r^2H_0}{1 - \frac{r^2}{h^2}} \cdot \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2}; y \geq h; \quad (2.13)$$

$$H_y = -\frac{2r^2H_0}{1 - \frac{r^2}{h^2}} \cdot \frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2}; y \geq h. \quad (2.14)$$

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).

Таблица 2.2 – Исходные данные для расчета

Номер варианта	H_0 , А/м	r , мм	h , мм	Δ , мм
1	10 ⁴	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

3 Методика магнитопорошкового контроля

Задачи контрольной работы

Разработать методику магнитопорошкового контроля ферромагнитных деталей ($\mu_r > 40$) на наличие поверхностных трещин. Исходные данные содержатся в таблице 3.1.

Указания – При выполнении работы руководствоваться [1, 2] и ГОСТ 21105–87.

Таблица 3.1 – Исходные данные для разработки методики

Номер варианта.	Диаметр детали, мм	Длина детали, мм	H_c , А/м	B_r , Тл	Напряжен- ность поля H для получения B_{rmax} , А/м	Ориентация трещин	Толщина неферромаг- нитного покрытия, мкм	Цвет поверхности	Минимальное раскрытие дефектов, мкм
1	20	250	1000	1,3	14000	Вдоль оси	5	Черный	25
2	20	250	320	1,17	5600	Вдоль оси	30	Светлый	10
3	20	250	2160	1,18	15200	Вдоль оси	10	Черный	25
4	10	120	640	1,1	3600	Поперек оси	35	Светлый	2,5
5	10	120	6800	0,7	16000	Поперек оси	0	Светлый	25
6	10	120	3440	1,04	18400	Вдоль оси	0	Черный	2,5
7	10	120	4160	0,91	14400	Поперек оси	5	Светлый	20
8	10	100	720	0,59	11600	Вдоль оси	25	Черный	2,5
9	15	100	3360	0,65	16800	Поперек оси	5	Черный	25
10	15	100	1200	0,7	8000	Неизвестна	10	Черный	2,5
11	15	100	2800	0,74	19200	Поперек оси	15	Черный	2,5
12	15	100	560	0,82	8800	Неизвестна	40	Светлый	10
13	15	100	600	0,71	2560	Неизвестна	50	Светлый	15
14	15	100	1440	0,67	6400	Поперек оси	10	Черный	10
15	15	120	520	0,85	5020	Вдоль оси	25	Светлый	2,5
16	10	120	960	0,93	4800	Поперек оси	10	Черный	20
17	10	120	400	1,11	3200	Вдоль оси	25	Черный	2,5

Порядок выполнения работы.

- 1 Эскиз или рисунок контролируемого объекта.
- 2 Подготовка к контролю.
- 3 Условный уровень чувствительности.
- 4 Требуемая шероховатость поверхности.
- 5 Выбор способа магнитопорошкового контроля.
- 6 Вид, способ и схема намагничивания.
- 7 Род тока.
- 8 Режим намагничивания.
- 9 Тип дефектоскопа.
- 10 Цвет порошка.
- 11 Дисперсионная среда.
- 12 Нанесение магнитного порошка, суспензии или магнитогумированной пасты на объект.
- 13 Осмотр детали.
- 14 Типичные признаки дефектов по картине осаждения порошка.
- 16 Размагничивание объекта контроля.
- 17 Проверка качества размагничивания объекта контроля.

4 Определение оптимального режима намагничивания при контроле ферромагнитных изделий с использованием программного продукта пакета ANSYS Academic Research EM

По данным таблицы А.1 строим кривую намагничивания материала контролируемого изделия $B = f(H)$ (рисунок 4.1). Используя данные этой кривой, строим график зависимости $\mu_r = B/(\mu_0 H) = f(B)$ (рисунок 4.2, а). Расчет оптимального режима намагничивания сводится к отысканию максимального приращения производной на ниспадающей (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 $d^2\mu_r/dB^2 = 0$).

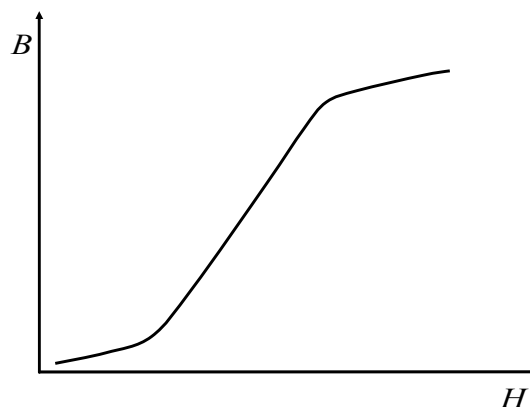


Рисунок 4.1 – Кривая намагничивания материала изделия

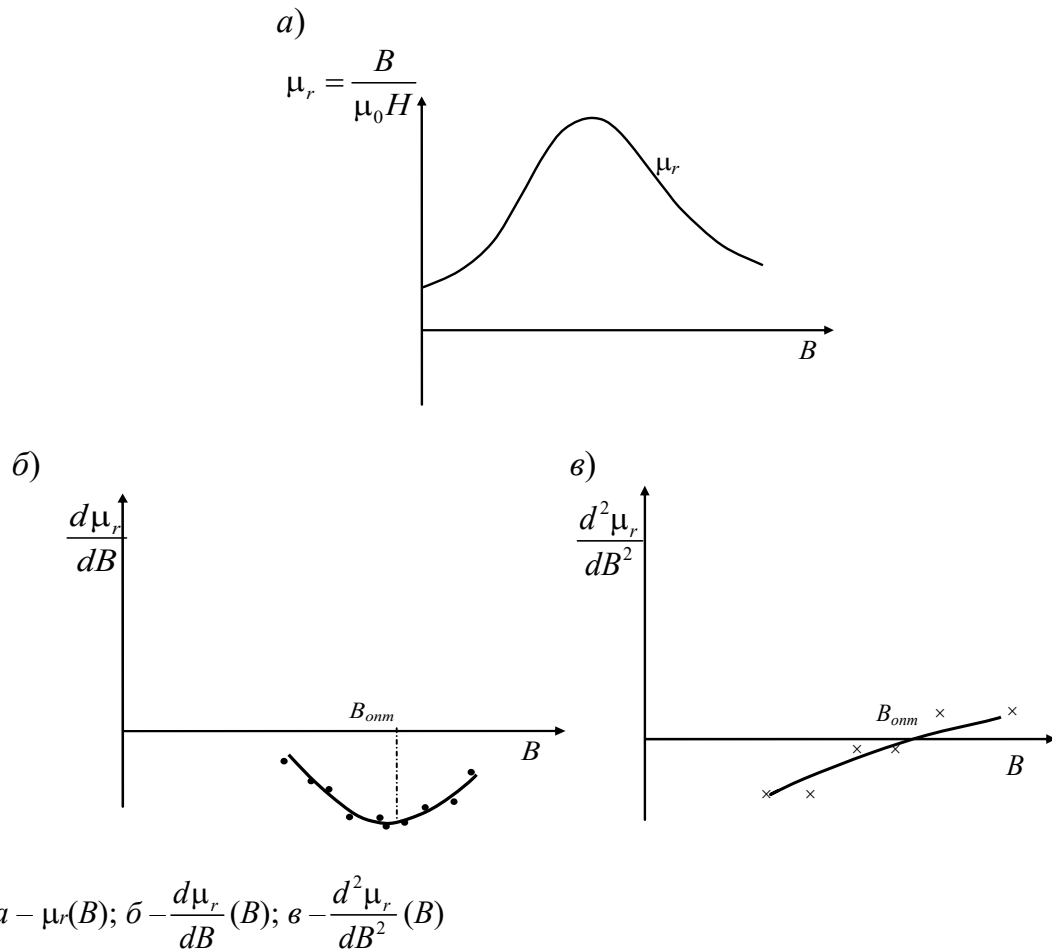


Рисунок 4.2 – Графики зависимостей μ_r , $\frac{d\mu_r}{dB}$, $\frac{d^2\mu_r}{dB^2}$ от индукции в исследуемом сечении

Простейший способ найти $\frac{d^2\mu_r}{dB^2}$ – 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.

$$\frac{d\mu_r}{dB} = 3aB^2 + 2bB + c;$$

$$\frac{d^2\mu_r}{dB^2} = 6aB + 2b = 0;$$

$$B = -\frac{b_{cp}}{3a_{cp}}. \quad (4.1)$$

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

Вычислив b_{cp} и a_{cp} и подставив в (4.1), получим значение B_{onm} .

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

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 4.2).

$$\begin{cases} \mu_{r1} = a \cdot B_1^3 + b \cdot B_1^2 + c \cdot B_1 + d; \\ \mu_{r2} = a \cdot B_2^3 + b \cdot B_2^2 + c \cdot B_2 + d; \\ \mu_{r3} = a \cdot B_3^3 + b \cdot B_3^2 + c \cdot B_3 + d; \\ \mu_{r4} = a \cdot B_4^3 + b \cdot B_4^2 + c \cdot B_4 + d. \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\frac{d\mu_r}{dB} \approx \frac{\mu_r\left(B_i + \frac{h}{2}\right) - \mu_r\left(B_i - \frac{h}{2}\right)}{h}; \quad (4.3)$$

$$\frac{d^2\mu_r}{dB^2} \approx \frac{\mu_r(B_i + h) - 2\mu_r(B_i) + \mu_r(B_i - h)}{h}. \quad (4.4)$$

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

Задание

Используя данные таблицы А.1, по указанию преподавателя выполнить расчет оптимального режима намагничивания одним из описанных выше способов.

5 Расчет электромагнита для намагничивания постоянным полем изделий в процессе магнитного контроля

Расчет выполнен по методике, изложенной в [2]. 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) должна быть в 2–3 раза больше толщины намагничиваемого изделия [3]. 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 (см. рисунки 5.1 и 5.2).

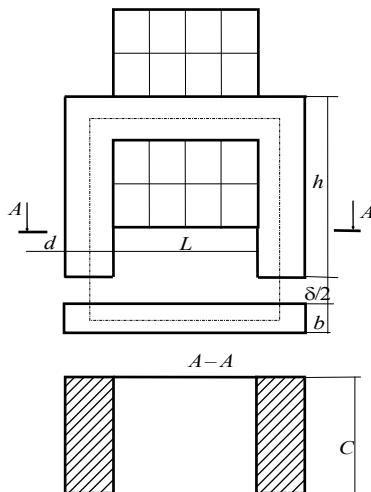


Рисунок 5.1 – Расчетная схема электромагнита намагничивающего устройства

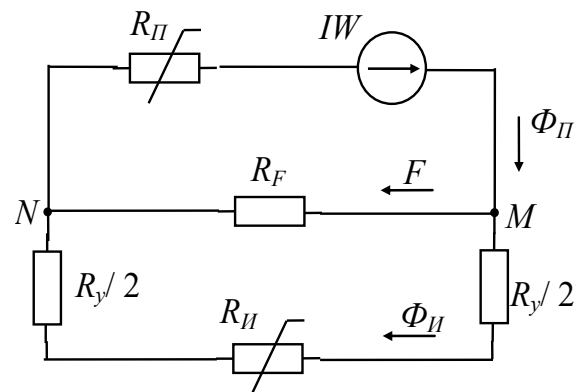


Рисунок 5.2 – Эквивалентная электрическая электромагнита намагничивающего устройства

Рассмотрим сумму падений магнитных напряжений в изделии $U_{И}$, в зазорах U_y , в магнитопроводе $U_{П}$:

$$\begin{cases} U_{И} = H_{И} l_{И} = H_{И} (L + b + d); \\ \Phi_{И} = B_{И} S_{И}; S_{И} = bc. \end{cases} \quad (5.1)$$

Строим кривую намагничивания материала изделия (рисунок 5.3). Используя выражения (5.1), по 10...12 значениям $H_{И}$ и $B_{И}$, взятым с кривой намагничивания, строим график зависимости $U_{И} = f(\Phi_{И})$, а затем $U_y = f(\Phi_{И})$ в той же системе координат (см. рисунок 5.3).

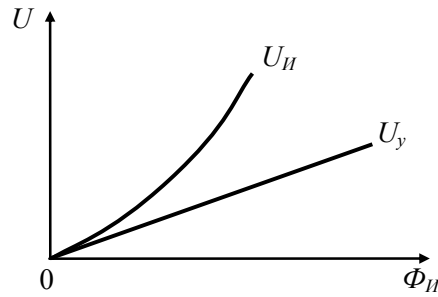


Рисунок 5.3 – Зависимости магнитных напряжений в зазоре U_y и в изделии U_{II} от магнитного потока в изделии

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

где H_0 – напряженность поля в зазоре;

δ – толщина суммарного зазора;

$$S_{II} = cd.$$

Из выражения (5.2) следует, что для построения прямой достаточно рассмотреть одно значение Φ_{II} .

Затем на отдельном графике строим кривую падения магнитного напряжения в магнитопроводе в зависимости от потока в нем $U_{II} = f(\Phi_{II})$ (рисунок 5.4).

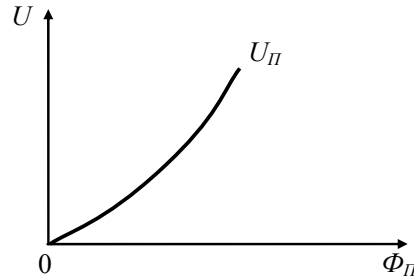


Рисунок 5.4 – Зависимость магнитного напряжения в магнитопроводе от магнитного потока в нем

$$\begin{cases} U_{II} = H_{II} \cdot l_{II} = H_{II} \cdot (2 \cdot h + L); \\ \Phi_{II} = B_{II} \cdot S_{II} = B_{II} \cdot c \cdot d. \end{cases} \quad (5.3)$$

Значения B и H определяют по кривой намагничивания материала магнитопровода.

Чтобы пересчитать U_{II} в зависимости от Φ_{II} , запишем уравнение Кирхгофа для точки M эквивалентной электрической схемы (см. рисунок 5.2).

$$\Phi_{II} - \Phi_{II} - F = 0, \quad (5.4)$$

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

Так как отношение потоков Φ_{II} и F обратно пропорционально магнитным сопротивлениям $R_{II} + R_y$ и R_F , то

$$\frac{F}{\Phi_{II}} = \frac{R_{II} + R_y}{R_F}; \quad F = \Phi_{II} \cdot \frac{R_{II} + R_y}{R_F}, \quad (5.5)$$

где R_F – магнитное сопротивление потока рассеяния между полюсами электромагнита, Гн^{-1} ;

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

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):

$$\Phi_{II} = \frac{\Phi_{II}}{1 + \frac{R_{II} + R_y}{R_F}}, \quad (5.8)$$

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

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

$$R_{II} = \frac{l_{II}}{\mu_0 \cdot \mu_{II} \cdot S_{II}} = \frac{H_{II} \cdot l_{II}}{B_{II} \cdot S_{II}};$$

l_{II} – длина средней линии магнитного потока в изделии;

B_{II} и H_{II} – соответствуют оптимальному режиму намагничивания.

Путем пересчета с использованием формулы (5.6) из последнего графика получаем зависимость $U_{II} = f(\Phi_{II})$ (рисунок 5.5). Затем, суммируя U_{II} , U_y , U_{II} , получаем зависимость $U_{\Sigma} = f(\Phi_{II})$ (рисунок 5.6). Зная сечение изделия, строим вторую ось (B_{II}), т. е. аналогичную зависимость $U_{\Sigma} = f(B_{II})$, где $B_{II} = \Phi_{II} / S_{II}$.

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

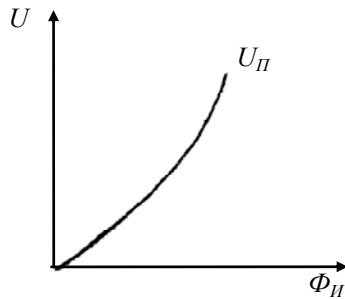


Рисунок 5.5 – Зависимость магнитного напряжения в магнитопроводе от магнитного потока в изделии

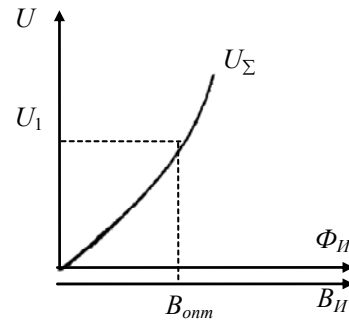


Рисунок 5.6 – Зависимость суммарного магнитного напряжения в магнитопроводе от магнитного потока и индукции в изделии

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):

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

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; ρ – 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	δ , мм	h , мм	c , мм	B_{onm} , 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	1	140	200	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 Вопросы и задачи практических занятий вихретокового контроля

Задание 1

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

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

Задание 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 6.1.

Указания – Для наиболее качественного измерения R_1 цилиндра необходимо, чтобы обобщенный параметр x был равен 5 [4]. В этом случае чувствительность S_{R1} максимальна. Отсюда рассчитывается оптимальная частота возбуждения f_{onm} . Выполним, например, расчет f_{onm} для медного цилиндри-

ческого 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

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

Таблица 6.1 – Данные для расчета частоты возбуждающего тока

Вариант	R_1 , мм	σ , МСм/м	μ_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

Задание 3

Пруток круглого сечения, изготовленный из материала с удельной электрической проводимостью σ , находится в поле соленоида (рисунок 6.1), питаемого переменным током частотой f . Постройте график распределения напряженности поля по сечению прутка, если напряженность поля на его поверхности равна H_0 . В расчетах принять абсолютную магнитную проницаемость материала $\mu_\alpha = \text{const}$. Сделайте выводы. Исходные данные содержатся в таблице 6.2.

Указания – Напряженность поля H_i в произвольной точке A в теле прутка на расстоянии r_i от его оси определяется из выражения [4]

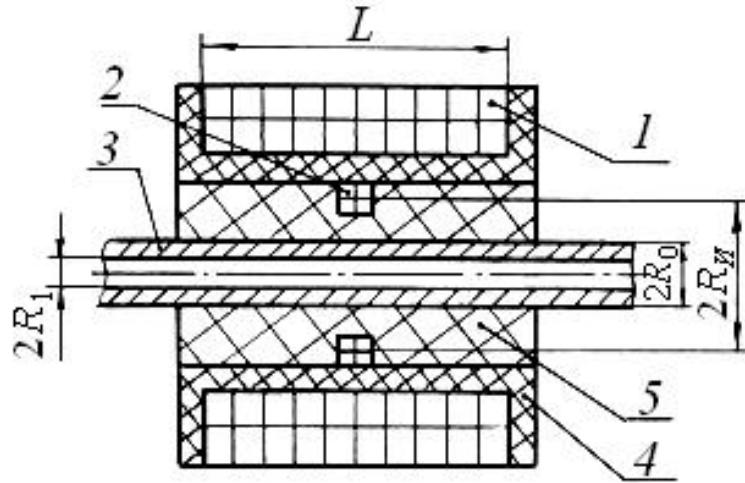
$$H_i = H_0 \frac{J_0(kr_i)}{J_0(kr_0)},$$

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.



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

Рисунок 6.1 – Проходной трансформаторный вихретоковый преобразователь

Таблица 6.2 – Исходные данные для расчета

Вариант	$H_0, 10^2 \cdot \text{А/м}$	$r, 10^{-3} \cdot \text{м}$	$f, \text{Гц}$	$\sigma, 10^7 \cdot \text{См/м}$	μ_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

Числовые значения функций $J_0(kr)$ и $J_0(kr_0)$ в зависимости от значений их аргументов могут быть определены с помощью таблицы 6.3.

Таблица 6.3 – 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

Продолжение таблицы 6.3

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 $r_1 = 6 \cdot 10^{-3}$ м от оси прутка.

Решение

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

$$kr_0 = 888 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 7,09; \quad kr_1 = 888 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 5,33.$$

С помощью таблицы 6.3, пользуясь методом интерполяции, получаем:

$$J_0(kr_0) = J_0(7,09) = 22,1; \quad J_0(kr_1) = J_0(5,33) = 7,2;$$

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

Использование годографов ЭДС измерительной обмотки вихретокового преобразователя для определения условий контроля.

Задание 4

Рассчитайте оптимальную частоту возбуждения накладного параметрического ВТП (рисунок 6.2) 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 6.4). Необходимые для расчета зависимости изображены на рисунках 6.3 и 6.4.

Указание – На рисунке 6.3 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 $h^* = h_{в*} + h_{и*}$ для случая контроля неферромагнитного листа с относительной толщиной $T^* = T/R$, где R – большее из значений $R_{в}$ и $R_{и}$.

$$R_B = \frac{R_{Be} + R_{Bi}}{2}; R_H = \frac{R_{He} + R_{Hi}}{2}; h_{B*} = \frac{h_B}{R_B}; h_{H*} = \frac{h_H}{R_B}.$$

Таблица 6.4 – Данные для расчета частоты возбуждения накладного параметрического ВП

Вариант	h_0 , мм	l , мм	$2R_H$, 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

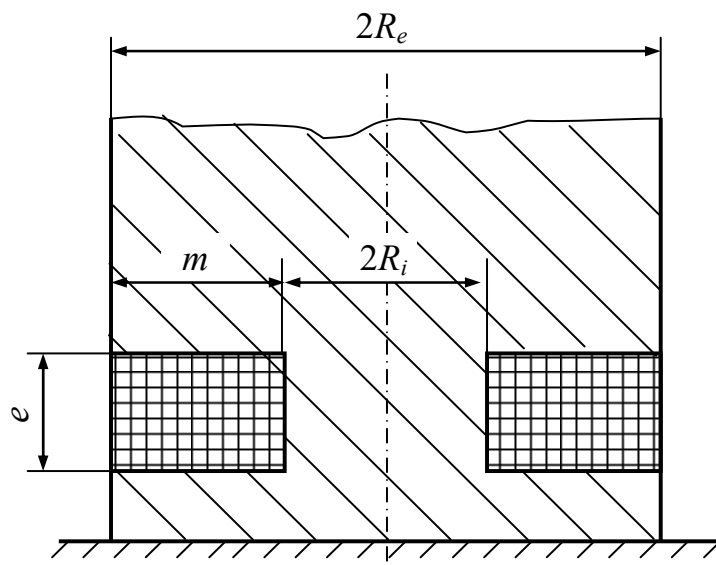


Рисунок 6.2 – Накладной параметрический преобразователь

Жирной линией выделен годограф $\dot{U}_{вн.*}(\beta)$, соответствующий полупространству ($T^* \rightarrow \infty$) при $h^* \rightarrow 0$. Как показано на рисунке 6.3, $U_{вн.*} = |\dot{U}_{вн.*}|$ резко убывает при увеличении h^* по закону, близкому к экспоненциальному. Годограф $\dot{U}_{вн.*}(\beta)$ переходит в полуокружность радиусом 0,5 при $T \rightarrow 0$.

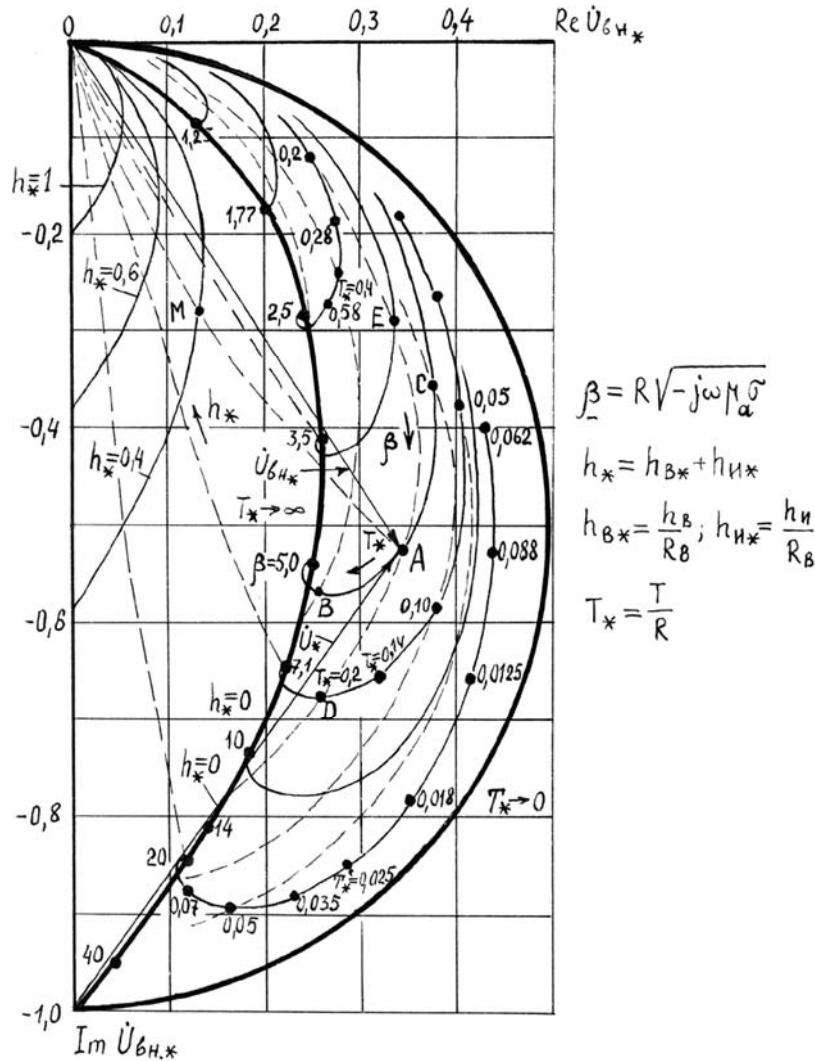


Рисунок 6.3 – Годографы относительного вносимого комплексного напряжения $\dot{U}_{вн.*}$ накладного вихретокового преобразователя при контроле ферромагнитного листа

Рассмотрим пример определения выходного напряжения ВТП с помощью годографа (см. рисунок 6.3). Допустим, что накладной ВТП используется для контроля листа с параметрами: $\sigma = 31$ МСм/м; $T = 2$ мм; $\mu_r = 1$. Параметры преобразователя: $R_B = 10$ мм; $R_H = 8$ мм. Режим контроля: частота $f = 1$ кГц; зазор между преобразователем и листом $h^* = h_{H*} + h_{B*}$.

Обобщенные параметры контроля

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

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 σ до 62 МСм/м конец вектора $\dot{U}_{вн.*}$ перемещается в точку D (β увеличивается в $\sqrt{2}$ раз), а при уменьшении до 15 МСм/м – в точку E (β 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; $W_B = 200$.

Рассчитаем относительную высоту расположения преобразователя над контролируемым полупространством:

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

$$\text{где } R = R_{cp} \left(1 + \frac{m^2}{24R_{cp}^2}\right); R_{cp} = \frac{R_e + R_i}{2}; R_{cp} = \frac{2,5 + 1}{2} = 1,75 \text{ мм};$$

$$m = R_e - R_i = 1,5 \text{ мм}.$$

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

Для полученного значения h_* по графику (рисунок 6.4) определяем $\beta_{opt} = 3,5$. Зная β_{opt} , по формуле $\beta = R_0 \sqrt{2\pi f \mu_r \mu_0 \sigma}$ определяем f_{opt} . При этом $\sigma \approx \sigma_{cp} = 25$ МСм/м.

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

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

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

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

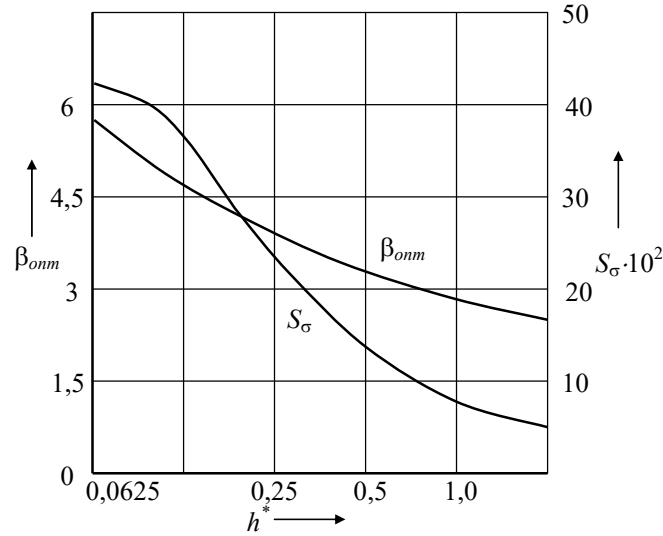


Рисунок 6.4 – Зависимость β_{omn} и S_σ от относительной высоты h^* расположения преобразователя над контролируемой поверхностью

Тогда

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

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

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

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

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 6.5, 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 6.5, 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 $4 \leq R^2 \omega \mu_a \sigma \leq 9$.

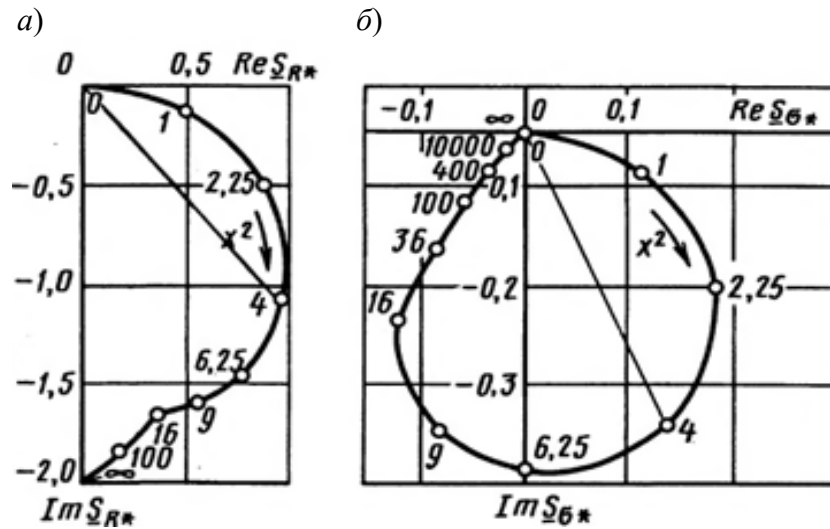


Рисунок 6.5 – Диаграммы чувствительности наружного проходного ВТП к изменениям радиуса (а) и удельной электрической проводимости (б) кругового цилиндра

Задание 5

Определить оптимальный диапазон изменения и оптимальное значение частот ВТП при определении удельной электрической проводимости цилиндра $\sigma = 6 \cdot 10^8$ См/м. Данные для расчета приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Данные для расчета частоты возбуждения накладного параметрического ВТП при определении удельной электрической проводимости σ объекта

Вариант	R , мм	μ_a , Гн/м	σ , 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		$8,5 \cdot 10^7$

Список литературы

1 **Лобастов, С. А.** Основы метрологии и методы измерения физических величин / С. А. Лобастов. – Москва: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ экспериментальной физики, 2018. – 412 с.

2 **Новиков, В. А.** Магнитный контроль в вопросах / В. А. Новиков. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – 344 с.: ил.

3 Приборы и методы электромагнитного контроля: методические рекомендации к курсовому проектированию / Сост. В. А. Новиков. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 29 с.

4 **Федосенко, Ю. К.** Вихретоковый контроль: учебное пособие для вузов / Ю. К. Федосенко, П. Н. Шкатов, А. Г. Ефимов; под ред. В. В. Ключева. – Москва: Спектр, 2018. – 224 с.

Приложение А (справочное)

Таблица А.1 – Исходные данные для построения кривой намагничивания материала контролируемого изделия

Напряженность намагничивающего поля H , А/м	Магнитная индукция B , Тл, для сталей следующих марок				
	10	20	30	Ст3	09Г2
200	0,09		0,09	0,2	0,06
500	0,535	0,5	0,49	0,85	0,31
1000	1,11	0,975	0,95	1,22	0,87
1500	1,25	1,24	1,165	1,35	1,15
2000	1,36	1,38	1,29	1,4	1,30
2500	1,445	1,43	1,3	1,47	1,41
3000	1,49	1,515	1,445	1,51	1,48
4000	1,575	1,585	1,53	1,57	1,565
5000	1,635	1,630	1,58	1,62	1,70
7500	1,71	1,725	1,68	1,7	1,73
10000	1,78	1,78	1,755	1,77	1,795
12500	1,835	1,83	1,81	1,83	1,82
15000	1,87	1,86	1,915	1,87	1,86
20000	1,94	1,94	1,945	1,95	1,93
25000	2,0	1,96	1,96	2,01	1,99
30000	2,04	2,04	2,01	2,07	2,03
35000	2,07	2,07	2,04	2,12	2,06
40000	2,09	2,11	2,06	–	2,085
45000	2,1	2,14	2,08	–	2,10
50000	2,1	2,166	2,1	–	2,12