

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева  
Уральского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



МИХАЙЛОВ Алексей Вадимович

**Высокоэффективные сканирующие системы  
для электромагнитно-акустической  
дефектоскопии длинномерных ферромагнитных  
объектов с большой толщиной стенки**

05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ,  
материалов и изделий

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Сморodinский Яков Гаврилович

Екатеринбург – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ</b> . . . . .	6
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> . . . . .	10
<b>1. ДЕФЕКТОСКОПИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭМА СПОСОБОМ (ОБЗОР)</b> . . . . .	20
1.1. Волноводный эхо-метод ультразвукового контроля длинномерных ферромагнитных объектов . . . . .	20
1.2. Развитие бесконтактного ЭМА метода УЗК . . . . .	21
1.3. ЭМА метод возбуждения и приёма ультразвуковых волн . . . . .	24
1.4. Основные механизмы ЭМА преобразования . . . . .	25
1.5. Типовые конструкции ЭМА преобразователей . . . . .	27
1.6. Эффективность ЭМА преобразования . . . . .	31
1.7. Генератор зондирующих импульсов . . . . .	33
1.8. Методы расчёта распределения поля и потока намагничивающих систем . . . . .	35
1.9. Обзор выпускаемых приборов для автоматизированного УЗК длинномерных ферромагнитных объектов ЭМА способом . . . . .	39
1.10. Выводы к главе 1 . . . . .	39
<b>2. ВЫБОР МОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ И РАЗРАБОТКА ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ПЕРВИЧНЫХ ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕГО ВОЛНОВОДНОГО КОНТРОЛЯ ЭМА МЕТОДОМ ДЛИННОМЕРНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ</b> . . . . .	42
2.1. Принципиальная схема волноводного контроля длинномерных ферромагнитных объектов ЭМА методом . . . . .	42

2.2.	Выбор моды для волноводного ЭМА эхо-метода контроля длинномерных ферромагнитных объектов . . . . .	44
2.3.	Расчёт геометрических параметров первичных ЭМА преобразователей для выбранной ультразвуковой моды . . . . .	47
2.4.	Конструкция однонаправленных первичных ЭМА преобразователей для многоканальной схемы сканирования . . . . .	50
2.5.	Выводы к главе 2 . . . . .	52
<b>3.</b>	<b>АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ ИЗ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ . . . . .</b>	<b>54</b>
3.1.	Экспериментальное исследование зависимости эффективности возбуждения и приёма ультразвуковых волн ЭМА методом от величины поляризующего поля . . . . .	54
3.2.	Математическое моделирование намагничивающих систем ЭМА преобразователей . . . . .	57
3.3.	Типовые схемы намагничивания . . . . .	58
3.4.	Оптимизация геометрических и магнитных параметров системы типа П-образный постоянный магнит . . . . .	63
3.5.	Создание сильных магнитных полей с помощью современных постоянных магнитов . . . . .	65
3.6.	Определение оптимальных геометрических и магнитных параметров неколлинеарной намагничивающей системы с ортогональным постоянным поляризующим полем . . . . .	68
3.7.	Экспериментальная проверка эффективности оптимизированной намагничивающей системы с ортогональным поляризующим полем . . . . .	71
3.8.	Выводы к главе 3 . . . . .	74
<b>4.</b>	<b>НАМАГНИЧИВАЮЩАЯ СИСТЕМА С ИМПУЛЬСНЫМ</b>	



ПРИЛОЖЕНИЕ А. Обзор выпускаемых приборов для автоматизированного УЗК длинномерных ферромагнитных объектов ЭМА способом . . . . .	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Скриншоты активных окон программы ANSYS . . . . .	133
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Скриншоты активных окон программы FEMM 4.2 . . . . .	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Электронная схема генератора зондирующих импульсов: блок формирования сигнала . . . . .	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Электронная схема генератора зондирующих импульсов: силовой блок . . . . .	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Электронная схема генератора для импульсного подмагничивания . . . . .	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Акт внедрения . . . . .	141

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

**Физические величины**

$\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал, Вб/м

$\vec{B}$  – магнитная индукция, Тл

$B_m$  – магнитная индукция на поверхности металла при максимальной амплитуде напряжённости внешнего магнитного поля, Тл

$B_n$  – нормальная составляющая вектора магнитной индукции, Тл

$B_\tau$  – тангенциальная составляющая вектора магнитной индукции, Тл

$B_z$  – результирующая магнитная индукция, создаваемая при неколлинеарном расположении постоянных магнитов, Тл

$B_{II}$  – магнитная индукция в полюсе П-образного импульсного электромагнита, Тл

$C$  – электрическая ёмкость, Ф

$\vec{D}$  – электрическая индукция, Кл/м<sup>2</sup>

$\vec{E}$  – напряжённость электрического поля, В/м

$\vec{H}$  – напряжённость магнитного поля, А/м

$H_m$  – максимальная амплитуда напряжённости внешнего магнитного поля, А/м

$H_n$  – нормальная составляющая вектора напряжённости магнитного поля, А/м

$H_\tau$  – тангенциальная составляющая вектора напряжённости магнитного поля, А/м

$I$  – сила тока, А

$\vec{J}$  – плотность полного тока (сумма плотности электрического тока проводимости и плотности тока смещения), А/м<sup>2</sup>

$\vec{j}$  – плотность электрического тока (плотность тока проводимости), А/м<sup>2</sup>

$L$  – индуктивность, Гн

$\vec{M}$  – намагниченность материала, А/м

$M_s$  – намагниченность насыщения материала, А/м

$t$  – время, с

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м

$\mu_{эф}$  – эффективная магнитная проницаемость

$\xi$  – деформация образца

$\xi_m$  – максимальное значение деформации образца

$\rho$  – плотность среды, в которой распространяются ультразвуковые волны, кг/м<sup>3</sup>

$\sigma$  – удельная электропроводность материала, См/м

$\omega$  – круговая частота, рад/с

$\omega_{эф} = 2\pi f_{эф}$  – эффективная круговая частота, рад/с

### **Ультразвуковые параметры**

$A_{ЕМА}$  – коэффициент, определяемый процессами преобразования электромагнитной энергии в акустическую и обратно, а также расхождением и затуханием упругого импульса в объекте контроля

$c_l$  – скорость звука продольных волн, м/с

$c_t$  – скорость звука поперечных волн, м/с

$c_{фаз}$  – фазовая скорость волны вдоль поверхности, м/с

$\vec{F}$  – сила, определяющая смещение точек среды, Н

$f$  – частота тока в катушке первичного электромагнитно-акустического преобразователя (частота ультразвуковой волны), Гц

$f_{эф}$  – эффективная частота, Гц

$P$  – эффективность генерации ультразвука

$P(H_m)$  – эффективность генерации ультразвука за счёт магнитострикции

$U_2$  – напряжение генератора зондирующих импульсов, В

$U_{пр}$  – напряжение принимаемого сигнала, В

$\varepsilon$  – амплитуда принятого с помощью электромагнитно-акустического преобразователя сигнала, В

$\varepsilon_m$  – максимальная амплитуда принятого с помощью электромагнитно-акустического преобразователя сигнала, В

$\lambda$  – длина ультразвуковой волны, м

$\lambda_M$  – коэффициент магнитострикции

$\tau_u$  – длительность импульса тока, имеющего вид полуволны синусоиды, с

### **Конструктивные параметры**

$b$  – ширина ярма и полюсов импульсной намагничивающей системы, м

$h$  – толщина ферромагнитного объекта контроля, м

$h_z$  – зазор между полюсами импульсной намагничивающей системы и поверхностью ферромагнетика, м

$h_{я}$  – высота ярма импульсной намагничивающей системы, м

$l$  – межполюсное расстояние импульсной намагничивающей системы, м

$l_{II}$  – ширина полюса импульсной намагничивающей системы, м

$S_{я}$  – площадь поперечного сечения ярма импульсной намагничивающей системы, м<sup>2</sup>

$S_c$  – площадь поперечного сечения скин-слоя при расчёте параметров импульсной намагничивающей системы, м<sup>2</sup>

$S_{II}$  – площадь поперечного сечения полюсов импульсной намагничивающей системы, м<sup>2</sup>

$\bar{\Delta}$  – глубина скин-слоя для линейного случая перемангничивания ферромагнетика, м

$\tilde{\Delta}$  – глубина скин-слоя для нелинейного случая перемангничивания ферромагнетика, м



## Параметры для расчёта магнитных цепей с помощью аналогов законов полного тока, Ома и Кирхгофа

$F_M$  – общая магнитодвижущая сила импульсной намагничивающей системы, ампер-виток

$H_z$  – напряжённость магнитного поля в зазоре между полюсами импульсной намагничивающей системы и поверхностью ферромагнетика, А/м

$n$  – коэффициент, связывающий сопротивление скин-слоя ферромагнетика с магнитным сопротивлением воздуха

$r_\epsilon$  – магнитное сопротивление воздуха, по которому протекает поток, шунтирующий намагничиваемый участок ферромагнетика, ампер-виток/Вб

$r_z$  – общее сопротивление двух воздушных зазоров между полюсами электромагнита и поверхностью ферромагнетика, ампер-виток/Вб

$r_{II}$  – общее магнитное сопротивление двух полюсов, ампер-виток/Вб

$r_c$  – магнитное сопротивление скин-слоя намагничиваемого отрезка ферромагнетика, ампер-виток/Вб

$r_{я}$  – магнитное сопротивление ярма, ампер-виток/Вб

$U_{я}, U_n, U_z, U_c$  – падение магнитного потенциала на ярме, полюсах, зазоре и скин-слое, соответственно, ампер-виток

$\Phi_{я}, \Phi_\epsilon, \Phi_c$  – магнитный поток в ярме, воздухе и скин-слое, соответственно, Вб

$W$  – число витков катушки

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

Электромагнитно-акустический (ЭМА) метод допускает наличие воздушного зазора между преобразователем и поверхностью объекта контроля в отличие от метода ультразвукового контроля (УЗК) с применением пьезопреобразователей, чувствительность которого в большой степени зависит от качества и стабильности акустического контакта [1]. Из этого следуют основные преимущества бесконтактного ЭМА метода: возможность скоростного сканирования протяженных объектов и объектов с большой площадью поверхности, экстремально холодных или горячих объектов, а также объектов с неподготовленной (загрязнённой) поверхностью, независимость результатов контроля от качества акустического контакта, отсутствие износа ЭМА преобразователей.

Основное ограничение ЭМА метода заключается в малой эффективности взаимного преобразования электромагнитных и акустических волн, а, значит, и меньшая, по сравнению с контактными УЗК, чувствительность к дефектам. При этом под эффективностью понимается полученное в результате двойного ЭМА преобразования (излучение-приём) отношение сигнал/шум. Низкая эффективность двойного ЭМА преобразования особенно ярко проявляется при сканирующей диагностике ферромагнитных объектов с большой (более 15 мм) толщиной стенки, например, магистральных нефте- и газопроводов, листового проката, корпусов судов и цистерн. Это связано с растеканием магнитного потока по объёму массивного ферромагнитного объекта и соответствующим уменьшением амплитуды возбуждаемой электромагнитной волны. Для контроля упомянутых объектов целесообразно использовать так называемый волноводный способ [2].

Анализ имеющихся разработок [3–5] показывает, что повышение эффективности ЭМА преобразования может быть получено как за счёт оптимизации намагничивающей системы ЭМА преобразователя и применения новых методик

генерации ультразвуковых (УЗ) волн, так и за счёт определения и использования мод ультразвуковых колебаний с наименьшими значениями затухания и дисперсии. Для решения первого вопроса актуальным является теоретическое и экспериментальное исследование локального бесконтактного намагничивания массивных ферромагнитных объектов постоянным или импульсным поляризующим магнитным полем [6], а также исследование магнитострикционного механизма возбуждения УЗ колебаний. Для решения второго вопроса требуются экспериментальные исследования распространения УЗ колебаний различных мод в протяженных объектах с большой толщиной стенки.

Актуальность диссертационной работы подтверждается актом внедрения, а также тем, что тема исследований соответствует пункту 8 приоритетных направлений развития науки, технологий и техники, а также пункту 21 перечня критических технологий Российской Федерации в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 16.12.2015 г. N 623.

Исследования были выполнены в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Диагностика», № 01201463329), государственных проектов: программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Математическое и физическое моделирование неоднородных электромагнитных полей и разработка многоцелевых программно-аппаратных систем контроля с использованием бесконтактных методов измерений» (проект № 12-П-2-1031), программы молодежных инновационных проектов УрО РАН «Модельная и экспериментальная оптимизация подмагничивающей системы ЭМА преобразователя с ортогональным намагничиванием» (проект № 13-2-ИП-642).

### **Степень разработанности темы исследования.**

До проведения исследований по теме диссертации при недостаточной чувствительности ЭМА преобразователей при сканирующем контроле длиномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки (труб магистральных нефте- и газопроводов) использовались массивные намагничивающие системы массой до 100 кг [7, 8], сложные усилители и фильтры элек-

трического сигнала. В рамках настоящего исследования получены расчётные модели намагничивающих систем для создания сильных магнитных полей в материале ферромагнитного изделия любой толщины как для случая ортогонального, так и параллельного поверхности ферромагнетика подмагничивания. Была разработана методика бесконтактного возбуждения ультразвуковых волн магнитострикционным преобразователем без применения поляризующего поля, основанная на чётности эффекта магнитострикции.

При волноводном контроле длинномерных ферромагнитных объектов доступ к торцевой поверхности объекта контроля отсутствует, поэтому, как правило, использовались моды волн Лэмба:  $SV1$  и  $SV2$ . Эти моды обладают высокой дисперсией и при толщине ферромагнетика более 12 мм возбуждаются неэффективно. В данной работе было определено, что волна Рэлея и квазирэлеевская волна в наибольшей степени подходят для контроля длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки.

Результаты исследования послужили основой для конструирования реальных малогабаритных ЭМА преобразователей с увеличенной чувствительностью к дефектам, достигнутой за счёт увеличения эффективности ЭМА преобразования и оптимизации геометрических размеров намагничивающих систем.

### **Цели и задачи диссертационной работы:**

Целью работы является разработка новых высокоэффективных и малогабаритных электромагнитно-акустических преобразователей для бесконтактной сканирующей ультразвуковой диагностики длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

а) определение оптимальных мод ультразвуковых волн, которые позволят повысить чувствительность ЭМА метода при сканирующем контроле длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки, разработка конструкции и оптимизация геометрических параметров однонаправленных первичных ЭМА преобразователей, позволяющих излучать и принимать ульт-

тразвуковые волны только с одной стороны для исключения неоднозначности при волноводном контроле.

б) модельные и экспериментальные исследования пространственного распределения магнитного поля и магнитного потока от намагничивающих систем ЭМА преобразователей различной конфигурации:

- типовых намагничивающих систем, состоящих из постоянных магнитов;
- намагничивающих систем из постоянных магнитов с ортогональным к поверхности (электродинамический механизм ЭМА преобразования) и параллельным поверхности объекта контроля (магнитострикционный механизм ЭМА преобразования) поляризирующим полем;

в) разработка и экспериментальные исследования импульсной П-образной намагничивающей системы с параллельным поляризирующим полем для магнитострикционного механизма ЭМА преобразования.

г) теоретические и экспериментальные исследования бесконтактного магнитострикционного возбуждения ультразвуковых волн в ферромагнетике без применения поляризирующего поля.

### **Научная новизна.**

Научная новизна полученных в диссертации результатов может быть сформулирована в виде следующих положений:

1) установлено, что для контроля длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки в наибольшей степени подходят волны Рэлея и квазирэлеевские волны, так как они обладают малой дисперсией и затуханием, то есть хорошо возбуждаются и принимаются на большом интервале толщин объектов контроля без необходимости замены первичного ЭМА преобразователя. Показано, что с помощью вложенных друг в друга катушек в форме меандра возможны однонаправленное излучение и приём ультразвуковых волн ЭМА методом;

2) показано, что применяемые на сегодняшний день типовые схемы намагничивающих систем из постоянных магнитов не могут обеспечить оптимальные

для эффективного ЭМА преобразования магнитные характеристики поляризующего поля (магнитная индукция  $B_n > 1,2$  Тл для электродинамического механизма, напряжённость магнитного поля  $H_T \sim 300$  А/см для магнитострикционного механизма [9]) при контроле длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки;

3) определено, что для создания оптимального для эффективного ЭМА преобразования поляризующего поля, направленного ортогонально к поверхности ферромагнетика с большой толщиной стенки, следует применять намагничивающие системы, построенные по принципу неколлинеарного расположения постоянных магнитов. Установлено, что даже при малой массе такой намагничивающей системы ( $\sim 3$  кг), магнитная индукция во всей рабочей зоне намагничивающей системы превышает 2 Тл;

4) получены математические выражения для расчёта геометрических и электрических параметров импульсного П-образного электромагнита, создающего оптимальное для эффективного ЭМА преобразования параллельное поляризующее поле. Приведён пример расчёта импульсного электромагнита для случая ферромагнитной пластины толщиной 16 мм и установлено, что для такого случая магнитодвижущая сила (произведение числа витков катушки на протекающий по ней ток [10]) в катушке импульсного электромагнита должна составлять порядка 3000 ампер-витков;

5) показана возможность высокоэффективного магнитострикционного возбуждения волн Релея и Лэмба в ферромагнетиках без использования поляризующего поля.

### **Теоретическая и практическая значимость.**

Полученные в работе результаты моделирования пространственного распределения магнитных поля и потока от намагничивающих систем расширяют представления о характере локального намагничивания ферромагнетиков с большой толщиной стенки.

Применение однонаправленных первичных ЭМА преобразователей, волн Рэлея и квазирэлеевских волн, оптимизированных намагничивающих систем, а также способ магнестрикционного возбуждения ультразвуковых волн в ферромагнетиках без использования поляризующего поля помогают существенно увеличить эффективность ЭМА преобразования, а, значит, и чувствительность ЭМА метода к дефектам при сканирующем контроле длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки.

Разработанные намагничивающие системы могут применяться в составе высокоэффективных ЭМА преобразователей при сканировании основного материала толстостенного длинномерного ферромагнитного объекта, а также для ЭМА толщинометрии.

Разработанный на основе полученных результатов оптимизированный ЭМА преобразователь с постоянным ортогональным к поверхности объекта контроля поляризующим полем был использован АО «НПО «Интротест» при разработке сканера-дефектоскопа ЭМА-МГТУ-2, о чем свидетельствует акт внедрения.

Получен патент на полезную модель сканирующего дефектоскопа, в котором используется разработанная намагничивающая система.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Использование однонаправленных первичных ЭМА преобразователей, волны Рэлея и квазирэлеевских волн при неразрушающем контроле сплошности ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки волноводным способом позволяет увеличить чувствительность ЭМА преобразователей, а также исключить неопределённость измерения координат дефектов.

2. Неразрушающий контроль сплошности ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки ЭМА методом следует производить с помощью преобразователей, содержащих намагничивающие системы с неколлинеарным расположением постоянных магнитов, импульсные намагничивающие системы, либо системы, не требующие поляризующего поля.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается их устойчивой воспроизводимостью, использованием аттестованных измерительных приборов и экспериментальных установок, аттестованных методик измерений и методов обработки экспериментальных данных. Достоверность также подтверждается согласованностью промежуточных результатов с результатами других авторов. Выводы, сделанные в диссертации, логически следуют из результатов модельных и экспериментальных исследований и не противоречат современным научным представлениям.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах: 7-ом Всероссийском научно-техническом семинаре «Метрологическое обеспечение в области неразрушающего контроля качества» (г. Москва, 2010 г.), первой международной научной конференции «Наноструктурные материалы – 2008: Беларусь – Россия – Украина (НАНО – 2008)» (г. Минск), X, XI и XIII Всероссийских школах-семинарах по проблемам физики конденсированного состояния вещества (г. Екатеринбург, 2009 г., 2010 г., 2011 г.), Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля» (г. Екатеринбург, 2011 г., 2014 г.), научном семинаре «Бесконтактное возбуждение и приём ультразвука в металлах и практические аспекты их использования в неразрушающем контроле» (г. Екатеринбург, 2010 г.), научной сессии Института физики металлов УрО РАН по итогам 2012 и 2014 гг. (г. Екатеринбург, 2013 г., 2015 г.), III Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерения, контроль и диагностика – 2014» (г. Ижевск, 2014 г.), XIII и XIX Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (г. Екатеринбург, 2015 г., 2016 г.)

### **Публикации.**

Материалы диссертации опубликованы в 5 печатных работах и 10 тезисах



докладов, из них: 4 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ и WoS [11–14], 1 патент на полезную модель [15], 3 статьи в сборниках трудов конференций.

### **Личный вклад автора.**

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Постановка задач проводилась автором совместно с научным руководителем. Автором проведено компьютерное моделирование пространственного распределения магнитных полей и магнитного потока от намагничивающих систем различной конфигурации внутри и около поверхности длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки. А.В. Михайловым получены теоретические и экспериментальные данные, выполнена статистическая обработка, проведен анализ полученных данных с целью разработки новых оптимизированных намагничивающих систем с ортогональным и параллельным по поверхности объекта контроля поляризующими полями для высокоэффективных ЭМА преобразователей. Автором проведены экспериментальные исследования эффективности применения волн Рэлея и квазирэлеевских волн при контроле длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки волноводным ЭМА эхо-методом УЗК. Автором была выявлена возможность и разработана методика бесконтактного магнитострикционного излучения ультразвуковых волн без использования поляризующего поля. Результаты исследований неоднократно докладывались диссертантом на всероссийских и международных конференциях. Вместе с руководителем автор принимал участие в обсуждении результатов исследований, написании статей по выполненной работе и написании заявок на патенты РФ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, состоящего из 88 наиме-

нований, и 7 приложений. Общий объём диссертации составляет 141 страницу, в том числе 47 рисунков и 2 таблицы.

### **Содержание работы.**

В первой главе представлен обзор существующих средств, которые в настоящее время можно применять для проведения сканирования длинномерных ферромагнитных объектов ЭМА методом. Обсуждаются экспериментальные и теоретические аспекты возбуждения и приёма ультразвуковых волн ЭМА методом, основы волноводного ЭМА эхо-метода УЗК, приводятся типовые конструкции ЭМА преобразователей, основы метода численного компьютерного моделирования магнитных систем.

Во второй главе основное внимание уделено выбору моды ультразвуковой волны для сканирующего волноводного контроля длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки ЭМА методом. Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности волн Рэлея и квазирэлеевских волн для контроля длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки. Приведена информация о геометрических параметрах, конструкции и принципе работы однонаправленных первичных ЭМА преобразователей.

В третьей главе показаны результаты моделирования пространственного распределения магнитного поля и магнитного потока от типовых намагничивающих систем ЭМА преобразователей вблизи границы и в материале длинномерного ферромагнитного объекта с большой толщиной стенки, рассмотрен принцип построения намагничивающих систем, основанный на неколлинеарном расположении постоянных магнитов, представлены результаты модельной оптимизации и экспериментальной проверки полученной намагничивающей системы из постоянных магнитов.

Четвертая глава посвящена выводу аналитических выражений для расчёта геометрических и электрических параметров импульсной П-образной намагничивающей системы ЭМА преобразователя. Приведён пример расчёта парамет-

ров намагничивающей системы для возбуждения волн Рэлея на длинномерных ферромагнитных объектах с большой толщиной стенки, а также экспериментальная проверка полученных результатов.

В пятой главе приведены описание способа и исследование эффективности бесконтактного магнитострикционного возбуждения ультразвуковых волн без использования поляризующего поля.

Основные результаты работы изложены в выводах каждой главы и обобщены в заключении.

# 1. ДЕФЕКТОСКОПИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭМА СПОСОБОМ (ОБЗОР)

## 1.1. Волноводный эхо-метод ультразвукового контроля длинномерных ферромагнитных объектов

В промышленности часто возникает необходимость проведения неразрушающего контроля длинномерных ферромагнитных объектов, например, резервуаров, корпусов судов, котлов, магистральных нефте- и газопроводов. При разработке средств неразрушающего контроля для таких изделий нужно учитывать, что их поверхность может быть загрязнена, подвержена коррозии, либо на неё нанесён слой защитного материала. Кроме того, доступ к объекту контроля часто ограничен его размерами и конфигурацией, поэтому установка средств неразрушающего контроля возможна только с одной (внешней или внутренней) поверхности объекта. Для проведения контроля в таких условиях целесообразно применять относительно молодой, но достаточно перспективный волноводный ЭМА эхо-метод УЗК [16]. Метод основан на бесконтактном возбуждении и приёме ультразвуковых волн, распространяющихся по материалу объекта контроля, как по волноводу. Главное условие проявления волноводного эффекта заключается в ограниченности объекта контроля в одном или двух измерениях и протяженности в остальных измерениях [2]. Сущность метода можно описать на примере УЗК трубопроводов (рисунок 1.1) следующим образом:

- 1) излучающим первичным ЭМА преобразователем (катушкой с током высокой частоты) в стенке объекта контроля возбуждается бегущая ультразвуковая волна, направление распространения которой совпадает с окружностью поперечного сечения трубопровода;
- 2) при встрече ультразвуковой волны с нарушением сплошности материала, например, дефектом, коррозией или сварным швом, она частично отражается;

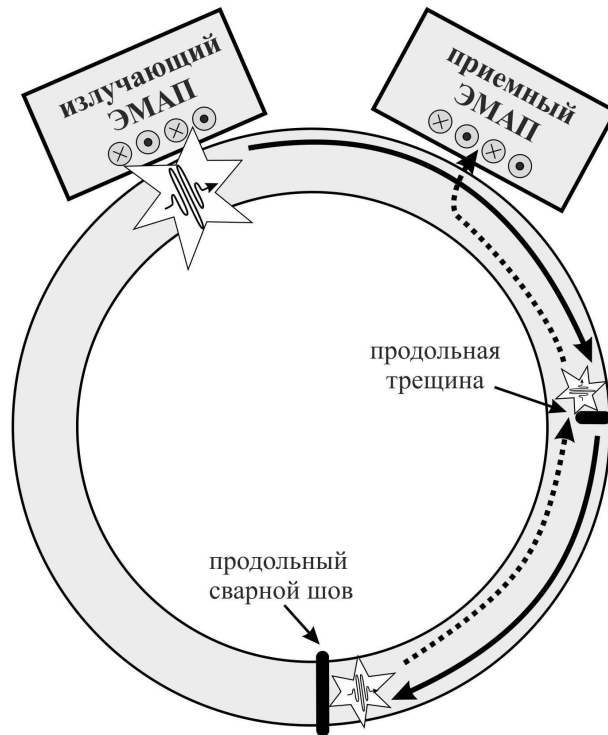


Рисунок 1.1 — Схема волноводного ЭМА эхо-метода УЗК

- 3) прямая и отражённая ультразвуковые волны преобразуются в электрический сигнал приёмным первичным ЭМА преобразователем;
- 4) при известной скорости распространения ультразвуковой волны и времени её регистрации можно определить местонахождение несплошностей, а по амплитуде принятого сигнала – оценить их размеры.

## 1.2. Развитие бесконтактного ЭМА метода УЗК

Первые работы по использованию электромагнитно-акустического бесконтактного метода генерации ультразвука в металле появились в 1930-х гг. [17], задолго до теоретических исследований. Приоритет в изучении ЭМА способа применительно к созданию ультразвуковых методов контроля принадлежит российской науке. В 1933 г. Б. Остроумовым и Л. Полотовским ЭМА метод впервые был использован для возбуждения свободных упругих колебаний в металлических стержнях [18]. Уже в 1939 г. Р. Рэндал применил ЭМА метод для контроля величины зерна [19]. После этого отечественными

и зарубежными авторами было опубликовано множество работ, в которых приведены экспериментальные исследования природы и применимости ЭМА метода для неразрушающего контроля.

Наибольших успехов в теоретическом исследовании природы ЭМА метода в нашей стране были достигнуты Г.А. Буденковым, С.Ю. Гуревичем, И.В. Ильиным, М.И. Кагановым, В.А. Комаровым, В.М. Конторовичем, В.Ф. Мужичкиным, А.В. Харитоновым, Ю.М. Шкарлетом, С.Н. Шубаевым и другими [20]. Шкарлет Ю.М. разработал общую теорию возбуждения акустических колебаний полями гармонических сил различной физической природы, в том числе и электромагнитной [21–23]. Подробная теория расчёта ЭМА преобразователей для работы с электропроводящими материалами была приведена С.Н. Шубаевым в работах [24, 25]. Г.А. Буденков и С.Ю. Гуревич предложили методику расчёта смещений в упругих волнах, возбуждаемых ЭМА методом, заключающуюся в представлении полей упругих волн, излучаемых реальными источниками, как суперпозиций волн, излучаемых элементарными источниками. Эту методику в литературе принято называть методом функции Грина [26].

Позже С.Ю. Гуревичем была разработана теория высокотемпературного ультразвукового контроля ферромагнитных металлоизделий с использованием ЭМА метода [27]. В.Ф. Мужичкиным, В.А. Комаровым, С.Ю. Гуревичем создана теория физических полей, позволяющая производить более точный расчёт за счёт учёта взаимного влияния квазиупругих и квазиэлектромагнитных колебаний при ЭМА преобразовании [28]. В.А. Харитонов и И.В. Ильин дополнили теоретические аспекты возбуждения и приёма волн Лэмба и Рэля в ферромагнетиках ЭМА методом [29, 30]. Более детально вопросы приёма волн Рэля и Лэмба решались С.Н. Шубаевым и Ю.М. Шкарлетом [31, 32].

Из зарубежных работ, как самую проработанную и результативную, можно выделить работу К. Кавашимы [33], расчёты в которой проводились методом Грина. Проблемы ЭМА преобразования исследовались также Р.Б. Томпсоном [34, 35], Х. Оги, М. Хирао, Груббиним, Е.Р. Доббсом [36] и Д. Ароном [37, 38].

Следует отметить, что многие отечественные работы более проработаны, чем зарубежные, но остаются и по сей день неизвестными для зарубежных исследователей вследствие отсутствия публикаций отечественных авторов в зарубежных журналах. Началом промышленного внедрения ЭМА метода можно считать публикацию в 1970 году В.А. Лончака [39], в которой приведён пример использования ЭМА метода для высокопроизводительного контроля рельсов.

Наибольшие технические успехи в производстве аппаратуры для ЭМА метода были достигнуты коллективами МНПО «Спектр», Института физики металлов УрО РАН, Челябинским политехническим институтом, Ленинградским электротехническим институтом, Кишиневским ВНИИНКом. Для толщинометрии труб диаметром 25 мм и более, изготовленных из углеродистых и низколегированных сталей, в 1973 году была разработана промышленная установка [40], в которой использовался эхо-импульсный метод на сдвиговых волнах, а подмагничивание создавалось импульсным электромагнитом (длительность подмагничивания 1,1 мс). Максимальный рабочий зазор между ЭМА преобразователем и поверхностью объекта контроля составлял 1,5 мм. Диапазон измерения толщин составлял 3-50 мм с точностью 2 %. В 1974 году был разработан и внедрен в эксплуатацию на Челябинском станкостроительном заводе малогабаритный толщиномер ТЭМАЦ-1, диапазон измерений 1,5-30 мм с точностью 1 % [41]. В середине 70-х годов разработаны и внедрены автоматизированные толщинометрические установки для контроля листов (УТ-40Б) и труб (УТ-80Б) [20, 42]. УТ-40Б позволяла контролировать металлические листы толщиной 0,5-6 мм с погрешностью 2 %. УТ-80Б имела 4 независимых канала и была предназначена для контроля черных труб диаметром от 30 до 146 мм и толщиной от 3 до 15 мм с погрешностью 2 %. В этих установках использовались ЭМА преобразователи с постоянными магнитами.

В 80-е годы XX века появились постоянные магниты на основе самария и кобальта, а затем на основе неодима, железа и бора. Значение остаточной магнитной индукции таких магнитов достигает 1,45 Тл, что позволяет разраба-

тивать малогабаритные ЭМА преобразователи для ручных и автоматизированных ЭМА средств диагностики.

В работах, посвящённых исследованию электромагнитно-акустического метода контроля, приведено множество его преимуществ над контактным способом. Главной причиной сдерживания его широкого использования в промышленности считается недостаточная чувствительность к дефектам типа нарушения сплошности. Для повышения чувствительности ЭМА приборов разработки ведутся в двух основных направлениях. Первое — повышение чувствительности аналоговой части дефектоскопов, толщиномеров и устройств для определения физико-механических свойств материалов. Улучшаются характеристики ЭМА преобразователей, генераторов зондирующих импульсов (ГЗИ) и усилителей. Второе — использование современных методов формирования, приёма, обработки и фильтрации информационных сигналов [42, 43]. В настоящее время успешно используются оба направления повышения чувствительности метода.

### **1.3. ЭМА метод возбуждения и приёма ультразвуковых волн**

Электромагнитно-акустическое преобразование есть частичное превращение энергии электромагнитных колебаний в энергию акустических колебаний. С равной эффективностью происходит как генерация упругих волн в среде электромагнитным полем, так и возбуждение электромагнитных волн ультразвуком, падающим на поверхность проводника. Прямым ЭМА преобразованием, как правило, называют преобразование электромагнитных волн в акустические, преобразование акустических волн в электромагнитные — обратным ЭМА преобразованием. Принципиально постановка эксперимента по электромагнитному возбуждению звука проста [44]: на границу металла нужно подать электромагнитную волну, которая преобразуется в распространяющуюся по металлу УЗ волну, и измерить амплитуду возбуждаемого звука, преобразованного в электромагнитную волну по достижении второй границы металла (рисунок 1.2).



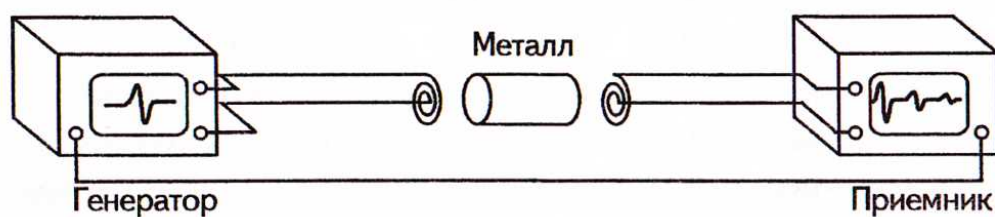


Рисунок 1.2 — Принципиальная схема ЭМА системы

Ослабление сигнала происходит как при прямом, так и при обратном ЭМА преобразовании, и в такой постановке эксперимента задача носит характер классической задачи радиолокации: генерации мощного зондирующего импульса и приёма слабого отражённого сигнала.

#### 1.4. Основные механизмы ЭМА преобразования

При возбуждении и приёме акустических волн ЭМА методом имеют место два основных механизма: магнитострикционный, проявляющийся у ферромагнетиков и электродинамический, присущий всем электропроводящим материалам. При контроле ЭМА методом объектов с высокой магнитной проницаемостью параллельно двум основным механизмам работает третий, магнитный механизм ЭМА преобразования, обусловленный колебаниями поверхности в магнитном поле [20]. Этот механизм по эффективности существенно уступает электродинамическому и магнитострикционному, поэтому обычно его не рассматривают, однако необходимо учитывать его влияние при возбуждении и приёме продольных волн в ферромагнетиках при электродинамическом механизме, так как в этом случае эффекты намагничивания и вихревых токов противодействуют друг другу и продольная волна возбуждается и принимается неэффективно [45].

Эффективность магнитострикционного и электродинамического механизмов определяется по большей части выбором поляризующего магнитного поля. В частности, для магнитострикционного механизма необходимо параллельное поверхности ферромагнитного объекта поляризующее поле (рисунок 1.3),

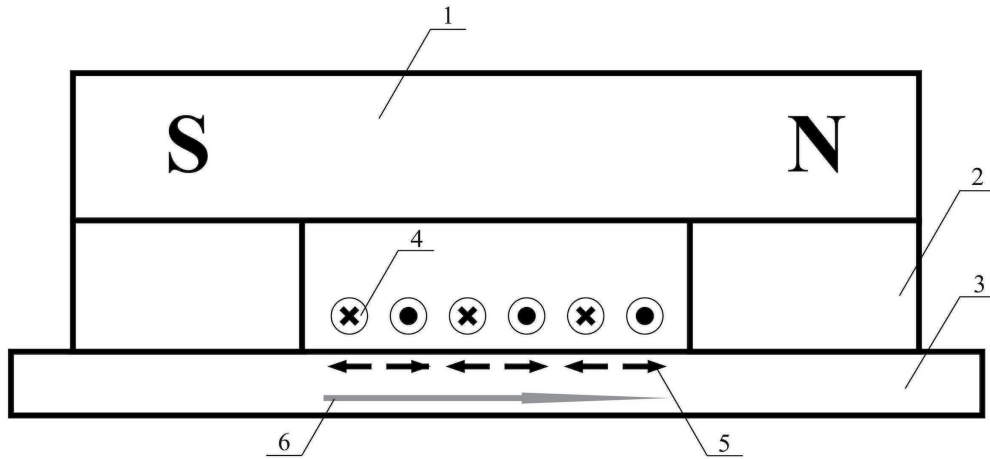


Рисунок 1.3 — Магнитострикционный механизм ЭМА преобразования: 1 – постоянный магнит; 2 – полюса П-образного магнита; 3 – объект контроля; 4 – катушка в форме меандра для возбуждения/приёма ультразвуковых волн; 5 - переменное магнитное поле, вызываемое катушкой 3; 6 - направление поляризующего поля

для электродинамического механизма, в свою очередь, к ферромагнетику необходимо приложить ортогональное поляризующее поле (рисунок 1.4).

Магнитострикционный механизм ЭМА преобразования использует явление самопроизвольной деформации кристалла при изменении магнитного порядка или вектора намагниченности. Магнитострикционный эффект является обратимым, поэтому при удалении намагничивающего поля состояние материала ферромагнетика возвращается к исходному. Катушка, находящаяся вблизи поверхности ферромагнитного объекта контроля, создаёт высокочастотное электромагнитное поле, которое, в свою очередь, создаёт высокочастотные локальные растяжения и сжатия ферромагнитного материала, вызывая тем самым образование акустических колебаний в этом материале. В ЭМА преобразователях на магнитострикции поляризующее поле усиливает и направляет напряжения в материале ферромагнетика.

При электродинамическом механизме ЭМА преобразования (рисунок 1.4) катушка наводит в электропроводящем материале вихревые токи, которые взаимодействуют с ортогональным к поверхности материала поляризующим полем.

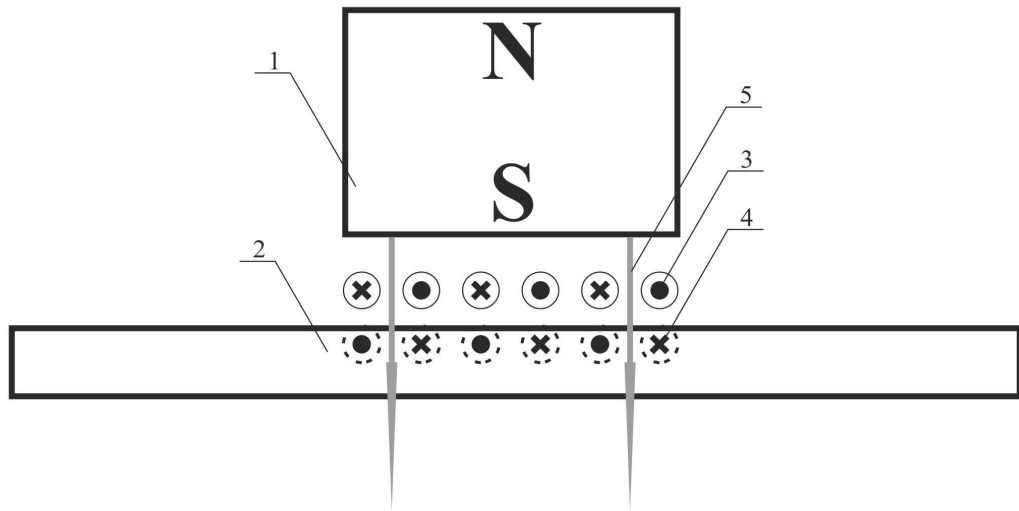


Рисунок 1.4 — Электродинамический механизм ЭМА преобразования: 1 – постоянный магнит; 2 – объект контроля; 3 – катушка в форме меандра для возбуждения/приёма ультразвуковых волн; 4 – контуры вихревых токов, вызываемых катушкой 3; 5 – направление поляризирующего поля

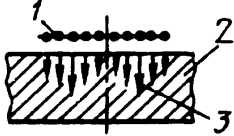
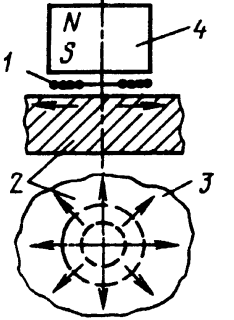
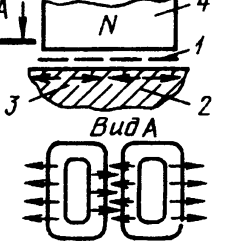
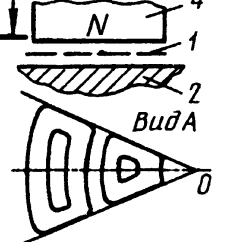
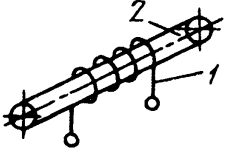
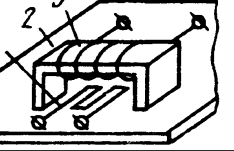
Под действием силы Лоренца в материале возникают колебания кристаллической решетки, в результате которых образуется бегущая ультразвуковая волна с частотой, равной частоте в катушке.

### 1.5. Типовые конструкции ЭМА преобразователей

С помощью ЭМА метода могут возбуждаться и приниматься все возможные моды акустических волн [16]. Конструкции типовых приставных ЭМА преобразователей для возбуждения и приёма продольных и поперечных волн приведены на рисунке 1.5. Типовые ЭМА преобразователи состоят из намагничивающей системы, представляющей собой одиночный постоянный магнит, систему из постоянных магнитов, либо электромагнит, а также первичного ЭМА преобразователя – катушки с током высокой частоты.

Как и в контактной акустике, различают отдельные, совмещенные и раздельно-совмещенные ЭМА преобразователи. В таблице 1.1 показаны схемы преобразователей, часто применяемых для возбуждения и приёма УЗ волн.

Таблица 1.1 — Основные конструктивные схемы ЭМА-преобразователей

№	Конструктивная схема	Основное назначение	Примечания, обозначения
1		Возбуждение и приём продольных колебаний, распространяющихся по нормали к поверхности объекта контроля	1 – спиральная катушка; 2 – объект контроля; 3 – распределение сил в металле
2		Возбуждение и приём поперечных колебаний. В возбужденной акустической волне частицы металла смещаются в плоскостях, перпендикулярных к направлениям витков катушки 1; в ближней зоне – параллельно поверхности объекта контроля	То же; 4 – магнит или сердечник электромагнита. Используется нормальная компонента вектора индукции магнитного поля магнита 4
3		Возбуждение и приём распространяющихся под углом к поверхности объекта контроля волн Рэлея и Лэмба периодической линейкой катушек	1 – линейка катушек; 2, 3 – то же, что в схеме 1
4		Фокусировка акустических волн Рэлея и Лэмба	То же; 0 – точка фокусировки
5		Контроль изделий цилиндрической формы	1 – цилиндрическая тонкостенная катушка; 2 – изделие
6		Контроль ферромагнитных листов волнами Рэлея и Лэмба	1 – катушка или линейка катушек; 2 – изделие (лист); 3 – электромагнит

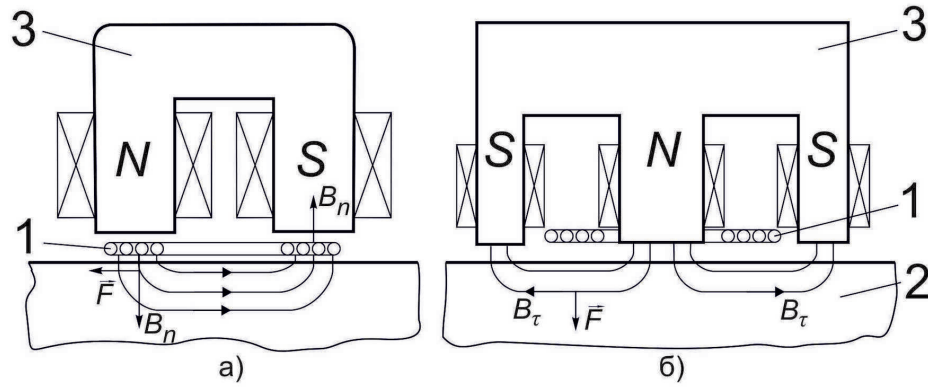


Рисунок 1.5 — Конструктивная схема ЭМА преобразователей: а — для поперечных волн; б — для продольных волн: 1 — первичный ЭМА преобразователь; 2 — объект контроля; 3 — намагничивающая система

В преобразователе, показанном на рисунке 1.5а, магнитное поле с индукцией  $B_n$  в зоне действия вихревых токов расположено по нормали к поверхности изделия. Сила  $\vec{F}$ , определяющая смещение точек среды, направлена по касательной к поверхности, и возбуждаются, в основном, поперечные акустические волны со скоростью распространения  $c_t$ . Напряжённость электрического поля, возникающего в результате двойного преобразования:

$$\vec{E} = \frac{2\vec{H} B_n^2}{\rho c_t}, \quad (1.1)$$

где:

$\vec{E}$  — напряжённость электрического поля, В/м;

$\vec{H}$  — напряжённость переменного магнитного поля, индуцируемого катушкой в изделии, А/м;

$B_n$  — нормальная составляющая вектора напряжённости магнитного поля, А/м;

$\rho$  — плотность среды, в которой распространяются ультразвуковые волны, кг/м<sup>3</sup>;

$c_t$  — скорость звука для поперечных волн, м/с.

В случае использования преобразователя, показанного на рисунке 1.5б, вектор магнитной индукции  $B_\tau$  направлен по касательной к поверхности изделия, поэтому в изделии будут возникать в основном продольные волны:

$$\vec{E} = \frac{2\vec{H} B_\tau^2}{\rho c_l \mu^2}, \quad (1.2)$$

где:

$B_\tau$  – тангенциальная составляющая вектора напряжённости магнитного поля, А/м;

$c_l$  – скорость звука для продольных волн, м/с;

$\mu$  – магнитная проницаемость среды, в которой распространяются ультразвуковые волны.

С другой стороны, в случае расположения преобразователя, показанного на рисунке 1.5б, в ферромагнитном материале будут возникать поперечные волны за счёт эффекта магнитострикции.

Таким образом, в ферромагнитном материале, рассматриваемый преобразователь будет излучать одновременно и продольные и поперечные волны.

Для возбуждения волн под углом к поверхности, в том числе волн Рэлея и Лэмба, применяют преобразователи, схема которых дана в пункте 6 таблицы 1.1. В этом случае элементы катушки располагают в виде меандровой решетки с расстоянием  $\lambda$  между двумя соседними элементами с одинаковым направлениями тока. Параметр  $\lambda$  равен длине возбуждаемой или принимаемой ультразвуковой волны:

$$\lambda = \frac{c_{фаз}}{f}, \quad (1.3)$$

где:

$c_{фаз}$  – фазовая скорость волны вдоль поверхности, м/с;

$f$  – частота ультразвуковой волны, Гц.

Такое расстояние обеспечивает оптимальное расположение областей растяжения и сжатия вблизи поверхности объекта контроля для возбуждения волны требуемой моды.

## 1.6. Эффективность ЭМА преобразования

Существует несколько путей увеличения чувствительности ЭМА преобразователей: увеличение мощности генератора зондирующих импульсов [3], уменьшение зазора между первичным ЭМА преобразователем и поверхностью объекта контроля, использование цифровой обработки принятого сигнала, увеличение поляризующего поля намагничивающей системы ЭМА преобразователя [12], применение систем с импульсным намагничиванием, действующим только во время излучения и приёма акустического импульса [6, 13]. При выполнении всех вышеперечисленных условий, чувствительность ЭМА метода можно приблизить к чувствительности контактного УЗК [4, 5]. Последние два пункта представляют особый интерес для науки и техники в свете появления современных редкоземельных магнитных материалов (Nd-Fe-B), программ для математического моделирования магнитных систем, развития базы радиоэлементов и компьютерной техники, позволяющей получить результаты расчёта магнитных систем в сжатые сроки.

Зону, в которой происходит взаимное преобразование высокочастотных электромагнитных и акустических колебаний, принято называть рабочей зоной. Материал объекта контроля, находящийся в этой зоне, необходимо намагнитить однородным полем до состояния, близкого к техническому насыщению. При этом достаточно намагнитить только скин-слой материала, обусловленный высокочастотным электромагнитным полем, создаваемым первичными ЭМА преобразователем. Зависимость эффективности двойного ЭМА преобразования от магнитной индукции в беспримесном железе приведена на рисунке 1.6.

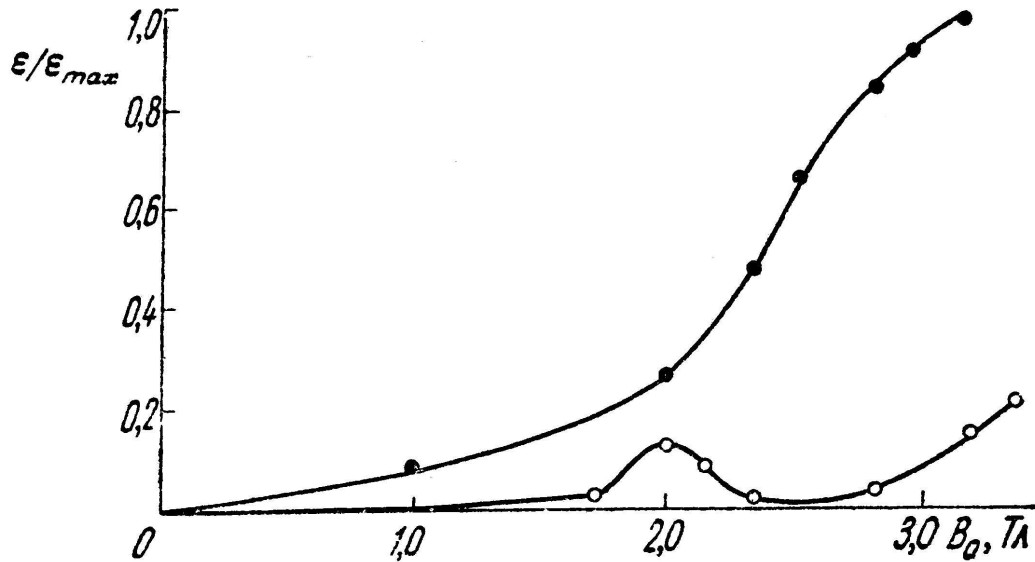


Рисунок 1.6 — Зависимость эффективности двойного ЭМА преобразования объёмных волн от магнитной индукции в армко-железе на частоте 2.3 МГц: верхняя кривая — ортогональное намагничивание (электродинамический механизм), нижняя кривая — параллельное намагничивание (магнитострикционный механизм) [9]

Анализ рисунка показывает, что максимум эффективности двойного ЭМА преобразования при параллельном подмагничивании достигается при величине индукции поляризирующего поля около 2 Тл, что соответствует напряжённости магнитного поля  $\sim 300$  А/см. При ортогональном подмагничивании эффективность ЭМА преобразования возрастает с ростом приложенного поля, и при индукции свыше  $\sim 1,2$  Тл эффективность преобразования с ортогональным подмагничиванием превосходит максимально возможную эффективность ЭМА преобразования с параллельным подмагничиванием.

При ЭМА преобразовании с параллельным подмагничиванием поверхности объекта необходимо учитывать толщину стенки объекта контроля, поскольку в данном случае магнитный поток «растекается» вглубь материала и необходимо довести до состояния технического насыщения всю толщину объекта контроля. При ЭМА преобразовании с ортогональным подмагничиванием к поверхности объекта намагничиванием растекание магнитного потока приводит к существенной неоднородности поляризирующего поля, что влечет за собой разную эффективность



работы отдельных витков первичных ЭМА преобразователей. При увеличении толщины стенки эффект растекания магнитного потока проявляется все больше, и создание оптимального по амплитуде намагничивающего поля в объекте толщиной более 16 мм (что соответствует толщине стенки типового магистрального газопровода диаметром 1420 мм) становится сложной задачей.

Возвращаясь к вопросу о контроле длинномерных ферромагнитных объектов, необходимо учесть, что длина и ширина первичных ЭМА преобразователей для возбуждения и приёма волн Лэмба и Рэля, представляющих собой катушки, намотанные в форме меандра, составляют порядка  $40 \times 40$  мм. Величина рабочей области намагничивающих систем должна быть достаточна для помещения в неё первичного ЭМА преобразователя. Это означает, что межполюсное расстояние П-образного магнита при параллельном подмагничивании, а также линейные размеры зоны, в которой создаётся однородное поле при ортогональном подмагничивании, должны составлять не менее  $40 \times 40$  мм. Также нужно отметить, что поляризуемое поле сильно зависит от зазора между намагничивающей системой и поверхностью ферромагнетика. При проведении сканирования намагничивающая система не должна касаться неровностей поверхности объекта контроля, например, задиров или сварных швов. Кроме того, между поверхностью трубы и намагничивающей системой помещаются первичные ЭМА преобразователи, а также часть несущей конструкции намагничивающей системы, поэтому величина зазора между намагничивающей системой и поверхностью объекта контроля должна составлять от 8 до 10 мм.

### **1.7. Генератор зондирующих импульсов**

Генератор зондирующих импульсов должен формировать в первичном ЭМА преобразователе импульсы тока, пиковое значение которых может достигать 100-200 А; импульсы должны формироваться в виде пакетов (цугов) с заданным частотным заполнением в зависимости от выбранной моды уль-

тразвуковой волны; скважность зондирующих импульсов при сканировании должна обеспечивать контроль всего объёма объекта контроля без пропусков; оптимальное количество периодов заполнения в цуге в зависимости от толщины контролируемого изделия может варьироваться и достигать 16; напряжение питания генератора не должно представлять опасность для оператора [5].

Генераторы зондирующих импульсов для ЭМА преобразователей обычно представляют собой тиристорные генераторы импульсов (рисунок 1.7).

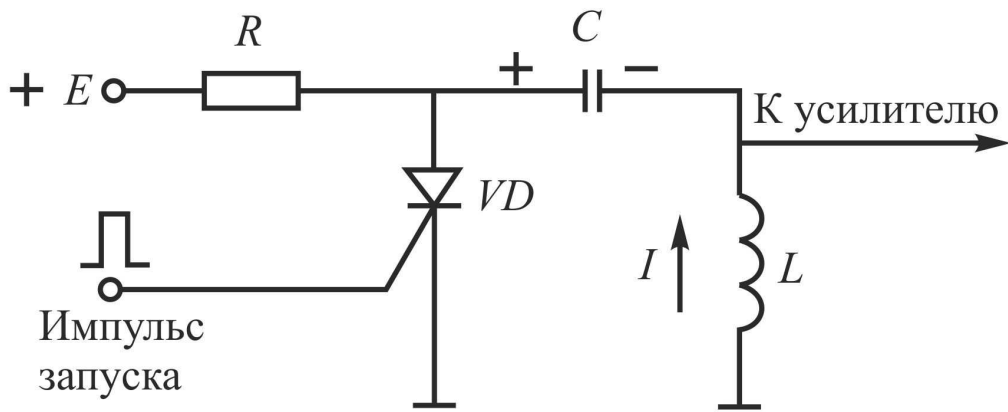


Рисунок 1.7 — Генератор импульсов возбуждения ЭМА преобразователя:  $R$  – зарядное сопротивление;  $L$  – катушка преобразователя;  $C$  – накопительная ёмкость;  $VD$  – тиристор

Длительность  $\tau_u$  импульса тока, имеющего вид полуволны синусоиды, и его амплитуда  $I$  определяются формулами:

$$\tau_u = \pi\sqrt{LC}, \quad (1.4)$$

$$I = U_2\sqrt{C/L}, \quad (1.5)$$

где:

$I$  – сила тока, А;

$L$  – индуктивность, Гн;

$C$  – электрическая ёмкость, Ф;

$\tau_u$  – длительность импульса тока, имеющего вид полуволны синусоиды, с;

$U_2$  – напряжение генератора зондирующих импульсов, В.

Если для излучения и приёма используется одна катушка, то амплитуда принятого сигнала

$$U_{np} = \frac{A_{EMA} U_2 \tau_u B^2 W^2}{\pi L}, \quad (1.6)$$

где:

$U_{np}$  – напряжение принимаемого сигнала, В

$W$  – число витков катушки;

$A_{EMA}$  – коэффициент, определяемый процессами преобразования электромагнитной энергии в акустическую и обратно, а также расхождением и затуханием упругого импульса в объекте контроля.

Если  $\tau_u = const$ , то величина сигнала  $U_{np}$  не зависит от числа витков, поскольку  $L \sim W^2$ .

Для выполнения экспериментальных исследований по бесконтактному возбуждению ультразвуковых волн ЭМА методом был разработан генератор зондирующих импульсов, электронная схема которого приведена в приложениях Г и Д.

## 1.8. Методы расчёта распределения поля и потока намагничивающих систем

На сегодняшний день известны два способа теоретического расчёта магнитных и геометрических параметров магнитных цепей: решение системы уравнений Максвелла и расчёты с использованием магнитных аналогов законов полного тока, Ома и Кирхгофа [46, 47]. Наиболее часто для расчёта устройств неразрушающего контроля используют именно вторую методику расчётов. Формальная аналогия между электрическими и магнитными цепями позволяет распростра-

нить все методы и технику расчёта нелинейных резистивных цепей постоянного тока на нелинейные магнитные цепи. При этом для наглядности можно составить эквивалентную электрическую схему замещения исходной магнитной цепи, с использованием которой выполняется расчёт [48]. Результат решения системы уравнений Максвелла в большой степени зависит от корректности выбора граничных условий и материальных уравнений. Этот способ расчёта подразумевает ряд допущений, и считается, что полученные результаты являются оценочными. Для задач магнитостатики, в которых амплитуда поля не изменяется во времени, напряжённость магнитного поля  $\vec{H}$  и магнитная индукция  $\vec{B}$  подчиняются следующим выражениям:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}, \quad (1.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (1.8)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (1.9)$$

где:

$\vec{j}$  – плотность электрического тока (плотность тока проводимости), А/м<sup>2</sup>;

$\vec{J}$  – плотность полного тока (сумма плотности электрического тока проводимости и плотности тока смещения), А/м<sup>2</sup>;

$\vec{D}$  – электрическая индукция, Кл/м<sup>2</sup>;

$t$  – время, с;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

При нелинейных свойствах материала магнитная проницаемость будет функцией от  $\vec{H}$ :

$$\mu(\vec{H}) = \frac{\vec{B}(\vec{H})}{\mu_0 \vec{H}}. \quad (1.10)$$

Для расчёта магнитных цепей необходимо выразить поле, удовлетворяющее уравнениям (1.7)–(1.9) через векторный магнитный потенциал  $\vec{A}$ . Плотность магнитного потока записывается через векторный магнитный потенциал как:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}. \quad (1.11)$$

Тогда выражение (1.7) можно переписать следующим образом:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \mu(\vec{H})} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}. \quad (1.12)$$

Для линейного изотропного материала (предполагая, что  $\nabla \times \vec{A} = 0$ ) выражение (1.12) сводится к:

$$-\frac{1}{\mu_0 \mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J}. \quad (1.13)$$

С помощью выражения (1.7) могут быть решены задачи магнитостатики с учётом нелинейной зависимости  $\vec{B}(\vec{H})$ . В общем трёхмерном случае векторный потенциал  $\vec{A}$  представляет собой вектор с тремя компонентами. Для двумерного случая плоских и осесимметричных задач два из трёх компонентов равны нулю, и для решения задачи остается определить только один компонент. Преимущество использования векторного потенциала заключается в том, что все условия объединены в одно уравнение, и при определении векторного потенциала  $\vec{A}$  можно с лёгкостью вычислить  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ .

Приведённые выше рассуждения справедливы для одной точки. Для расчёта магнитной цепи необходимо рассчитать множество точек, решая в каждой из них уравнения (1.7)–(1.13). Для решения этой задачи существует метод конечных элементов, представляющий собой метод численной реализации решения вариационной задачи – нахождение функции, минимизирующей соответствующую

ющий функционал. При этом необходимо решить две проблемы: найти соответствующий функционал и отыскать функцию, его минимизирующую. Такой метод решения краевых задач называется вариационным. Он основан на фундаментальном физическом принципе наименьшего действия. Как показывает практика, точности такого метода достаточно для успешного расчёта магнитных и геометрических параметров намагничивающих устройств при условии использования современных суперкомпьютеров и аккуратности в постановке задачи.

Существует несколько компьютерных пакетов для расчёта магнитных цепей: Femm [49], ANSYS [50], Elmer [51], Elcut [52]. Математическое обоснование их работы заключается в численном решении системы уравнений Максвелла при заданных граничных условиях. Они используют современные конечно-элементные технологии для выполнения электромагнитных расчётов. Компьютерное моделирование является в настоящее время важнейшей составной частью процесса проектирования устройств различных типов, что объясняется необходимостью сокращения сроков разработки новых устройств, а также наличием эффективных алгоритмов и программ компьютерного моделирования электрических и магнитных цепей. В данной работе используются зарекомендовавшие себя программы ANSYS и FEMM.

Программный пакет FEMM (Finite Element Method Magnetism – магнитные расчёты методом конечных элементов) - это набор программ для решения низкочастотных электромагнитных задач. С помощью данной программы можно создать модель для расчёта плоскопараллельного или плоскомеридианного (осесимметричного) стационарного и квазистационарного магнитного и стационарного электростатического полей, построить их картины и определить полевые и цепные параметры. Сегодня FEMM – это мощный комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов [49].

ANSYS – это программный пакет конечно-элементного анализа, решаю-

щих задачи в различных областях инженерной деятельности (прочность конструкций, термодинамика, механика жидкостей и газов, электромагнетизм), включая связанные междисциплинарные задачи (термопрочность, магнитоупругость и т.п.) [50]. Программная система ANSYS следует подходу к проектированию и производству изделий, который опирается на расчёт, строится с привязкой к анализу и позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания». ANSYS является широко известной CAE-системой (Computer-Aided Engineering) мирового уровня, которая используется на таких всемирно известных предприятиях, как ABB, BMW, Boeing, Caterpillar, Daimler-Chrysler, Exxon, FIAT, Ford, GeneralElectric, Lockheed, MeyerWerft, Mitsubishi, Siemens, Shell, Volkswagen-Audi и др., а также применяется на многих ведущих предприятиях промышленности РФ. В настоящее время программная система ANSYS представляет собой многоцелевой пакет проектирования и анализа, признанный во всем мире. Программный пакет ANSYS обладает существенным преимуществом по сравнению с другими программами, позволяющими моделировать распределение магнитных поля и потока, заключающемся в решении задач пространственного 3D-распределения.

Скриншоты активных окон программ ANSYS и FEMM приведены в приложениях Б и В.

## **1.9. Обзор выпускаемых приборов для автоматизированного УЗК длинномерных ферромагнитных объектов ЭМА способом**

Обзор представлен в приложении А.

## **1.10. Выводы к главе 1**

Обзор существующих на сегодняшний день методов и средств УЗК длинномерных ферромагнитных объектов ЭМА методом показал их низкую эффек-

тивность при контроле толстостенных объектов контроля: большим ограничением на толщину контролируемого изделия; недостаточную чувствительность к дефектам нарушения сплошности вследствие малой эффективности ЭМА преобразования; наличие мертвой зоны вблизи от ЭМА преобразователей, неоднозначность результатов контроля; сложность сканирования основного материала объекта контроля с помощью толщинометрии. Применение массивных намагничивающих систем из постоянных магнитов для ЭМА преобразователей значительно увеличивает массу и силу притяжения средств контроля к ферромагнетике, что усложняет их практическое применение и увеличивает вероятность повреждения диагностической аппаратуры и травмоопасность для персонала.

Актуальной является разработка ЭМА преобразователей для эхо-метода УЗК, лишенных мертвой зоны и обладающих низкой массой, большой эффективностью ЭМА преобразования и небольшим притяжением к ферромагнитным объектам контроля.

Для решения поставленной задачи необходимо выбрать такую моду ультразвуковой волны, на которую в наименьшей степени влияет толщина ферромагнитного объекта контроля. Также необходима оптимизация намагничивающих систем ЭМА преобразователей из постоянных магнитов численными методами с целью уменьшения их массогабаритных характеристик при увеличении создаваемого намагничивающими системами поляризующего поля, так как от него напрямую зависит эффективность ЭМА преобразования. Избежать большого притяжения к ферромагнитным объектам контроля возможно за счёт применения импульсных подмагничивающих устройств в качестве намагничивающих систем ЭМА преобразователей, либо за счёт использования методики бесконтактного магнитострикционного возбуждения ультразвуковых волн без использования поляризующего поля. Для получения однозначных результатов дефектоскопии и избавления от мертвой зоны необходимо разработать многоканальную схему сканирования, суть которой заключается в многократном «прозвучивании» одного и того же участка объекта контроля с помощью нескольких пар



излучающих и приёмных преобразователей, располагающихся на расстоянии друг от друга, и объединении результатов в одно измерение.

Таким образом, дальнейшие задачи настоящей работы заключаются в:

- выборе оптимальной моды ультразвуковой волны и разработке многоканальной схемы сканирования;
- оптимизации намагничивающих систем из постоянных магнитов (для электродинамического механизма ЭМА преобразования);
- определении геометрических и электрических параметров импульсного электромагнита (для магнитострикционного механизма ЭМА преобразования);
- исследовании и разработке методики бесконтактного магнитострикционного возбуждения ультразвуковых волн без использования поляризующего поля.

## **2. ВЫБОР МОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ И РАЗРАБОТКА ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ПЕРВИЧНЫХ ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕГО ВОЛНОВОДНОГО КОНТРОЛЯ ЭМА МЕТОДОМ ДЛИННОМЕРНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ**

### **2.1. Принципиальная схема волноводного контроля длинномерных ферромагнитных объектов ЭМА методом**

Система контроля для волноводного ЭМА эхо-метода УЗК может быть выполнена как в виде ручного, так и автоматизированного средства диагностики и условно может разделяться на несколько компонентов: излучающий и приёмный ЭМА преобразователи, электронная часть (источники питания, генераторы, усилители, АЦП и ЦАП, регистрирующие устройства), механическая часть (платформа, электродвигатели и их контроллеры, редукторы, движители в виде магнитных или немагнитных колес). Все компоненты ЭМА системы располагаются на единой платформе, приводимой в движение вручную, либо электродвигателями, соединёнными через редукторы с магнитными или немагнитными колесами, в зависимости от конфигурации ЭМА системы. ЭМА преобразователи располагаются на платформе так, чтобы зазор между зоной контроля ЭМА преобразователя и поверхностью объекта контроля был минимален. Разработка каждого компонента ЭМА системы является сложной и трудоёмкой задачей, но наибольший интерес для науки и техники представляет разработка ЭМА преобразователей, так как электрические схемы известны, а механическая часть, единожды изготовленная, может быть использована для ЭМА контроля объектов различной конфигурации.

Излучающий ЭМА преобразователь возбуждает акустические колебания, которые распространяются по материалу, отражаются от дефектов

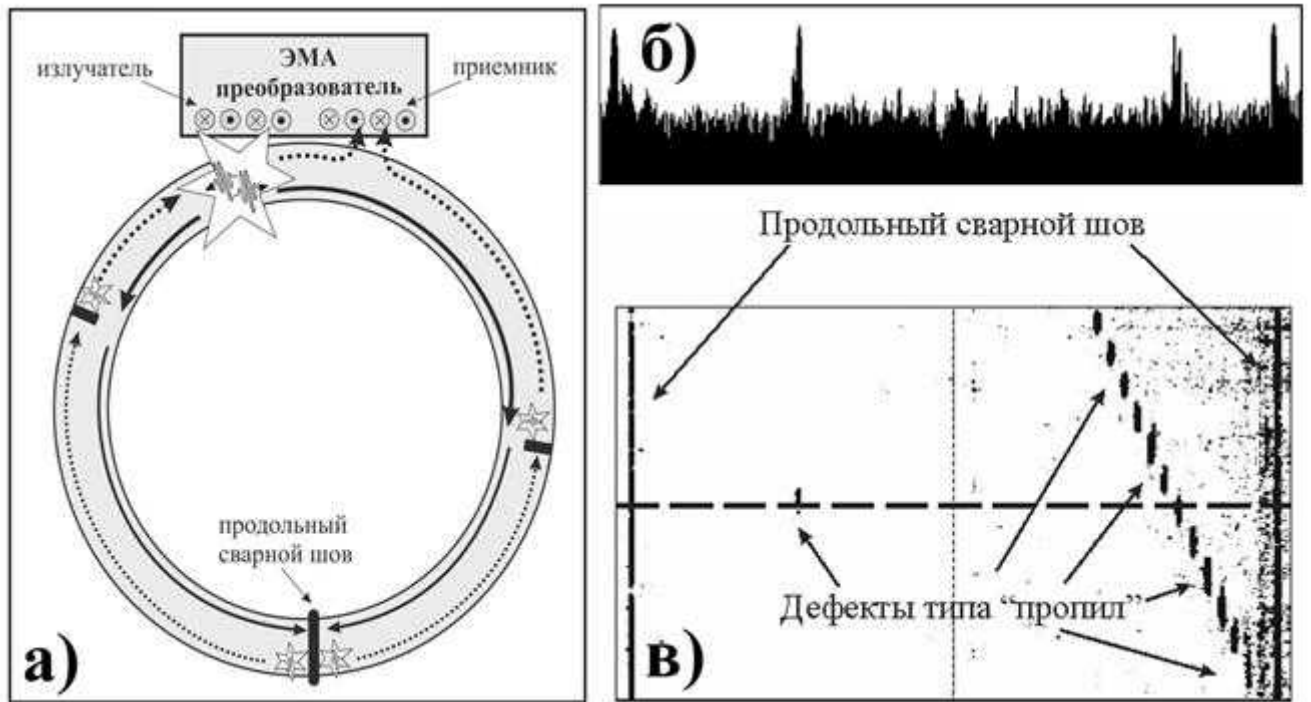


Рисунок 2.1 — Принципиальная схема работы ЭМА сканера-дефектоскопа (а), пример А-скана (б) и С-скан (в), полученный за один проход ЭМА сканера-дефектоскопа вдоль трубы с искусственными дефектами типа «пропил»

и продольных сварных швов и регистрируются приёмным ЭМА преобразователем (рисунок 2.1а). Полученный сигнал усиливается, фильтруется и преобразуется регистрирующим устройством в А-скан (рисунок 2.1б). При перемещении ЭМА преобразователей вдоль поверхности длинномерного ферромагнитного объекта, полученный массив А-сканов можно объединить в С-скан (рисунок 2.1в), по которому можно наглядно оценить наличие либо отсутствие дефектов в объекте контроля. Таким образом, можно проконтролировать весь основной металл объекта всего за один проход ЭМА системы.

Основные проблемы в построении ЭМА преобразователей заключаются в низкой эффективности ЭМА преобразования и большой дисперсности волн, применяемых для волноводного контроля [38]: зависимости их скоростей не только от частоты зондирующего импульса, но и от толщины стенки объекта контроля, поэтому выбор волны для волноводного контроля имеет решающее значение. Также необходимо учесть, что первичные ЭМА преобразователи (ка-

тушки) используемые для волноводного ЭМА метода обычно выполняются в форме меандра. Такие катушки генерируют и регистрируют ультразвуковые волны в двух направлениях, что может вызвать неоднозначность при наложении сигналов от дефектов.

## 2.2. Выбор моды для волноводного ЭМА эхо-метода контроля длинномерных ферромагнитных объектов

Обычно для волноводного метода применяют волны Лэмба (нормальная волна в слое со свободными поверхностями, характеризующаяся волноводным механизмом распространения и возбуждаемая при определённых соотношениях между толщиной слоя  $h$  и частотой  $f$ ; фазовая и групповая скорости распространения этих волн зависят от произведения  $hf$ ), Рэлея (поверхностная волна, характеризующаяся эллиптическим движением частиц среды и эффективной глубиной проникновения меньшей, чем длина волны), либо нормальные поперечные волны ( $SH$ , поперечная волна, в которой частицы среды колеблются перпендикулярно плоскости падения) [53, 54].

Волны Лэмба делятся на две группы: симметричные  $S$  и антисимметричные  $A$ . В симметричных волнах движение частиц среды происходит симметрично относительно средней плоскости  $z=0$  (рисунок 2.2а), а в антисимметричных – антисимметрично относительно плоскости  $z=0$  (рисунок 2.2б). В пластине толщиной  $2h$  при частоте  $f$  может распространяться определённое конечное число симметричных и антисимметричных волн Лэмба, отличающихся одна от другой фазовыми и групповыми скоростями и распределением смещений и напряжений по толщине пластины. Число волн тем больше, чем больше значение  $fh/c_{фаз}$ , где  $c_{фаз}$  – фазовая скорость сдвиговых волн.

Дисперсионные кривые, показывающие зависимость фазовых скоростей ультразвуковых волн от толщины объекта контроля и частоты возбуждаемого ультразвука [53, 55], показаны на рисунке 2.3.

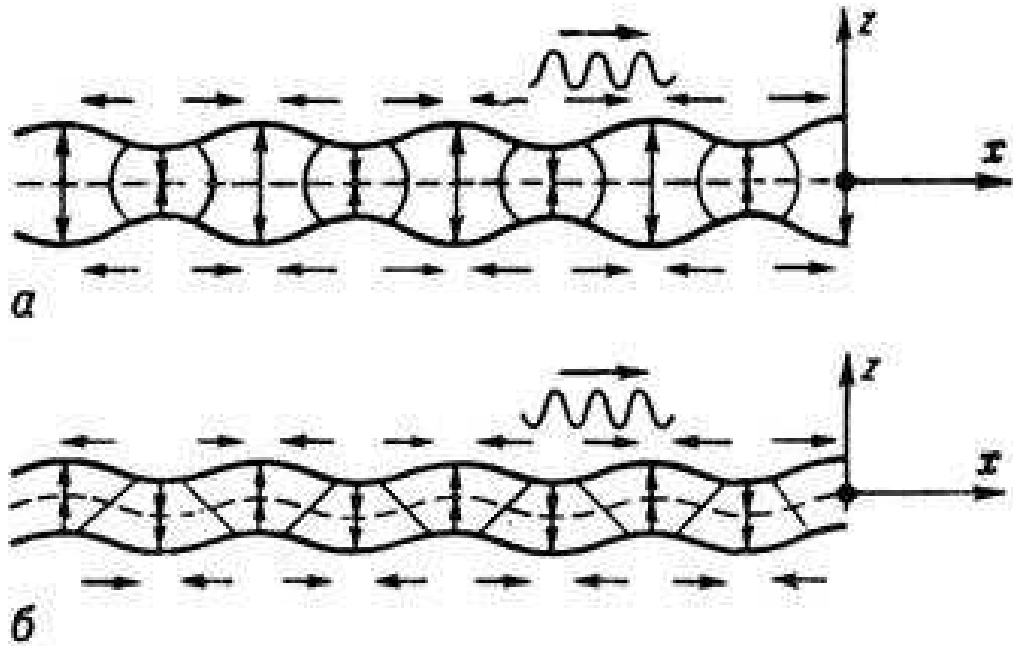


Рисунок 2.2 — Схематическое изображение движения частиц среды в пластинах при распространении в них симметричной (а) и антисимметричной (б) волн Лэмба; стрелками показано направление смещений по осям  $x$  и  $z$

При волноводном контроле объектов с толщиной стенки до 10 мм можно использовать моду  $SV1$ , либо  $SV2$  волны Лэмба ввиду высокого соотношения сигнал/шум для данных толщин. Именно такие моды используются в сканере-дефектоскопе «Автокон-ЭМА-МГТУ» [11].

Для объектов с толщиной стенки более 10 мм целесообразно использовать волну Рэлея с длиной волны 6 мм на частоте около 500 кГц. В идеальном случае волна Рэлея распространяется вблизи поверхности полупространства. Длинномерный ферромагнитный объект, обладающий конечной толщиной, сравнимой с длиной волны, полупространством не является, поэтому для корректного рассмотрения вопроса необходимо вновь проанализировать дисперсионные кривые (рисунок 2.3).

При толщине слоя более  $2\lambda$  (точка 1 на рисунке 2.3), фазовая скорость (следовательно и условия возбуждения) волны Рэлея практически совпадают с фазовой скоростью нулевой симметричной ( $S0$ ) и нулевой антисимметричной ( $A0$ ) нормальных волн, которые и излучаются с практически одинаковыми

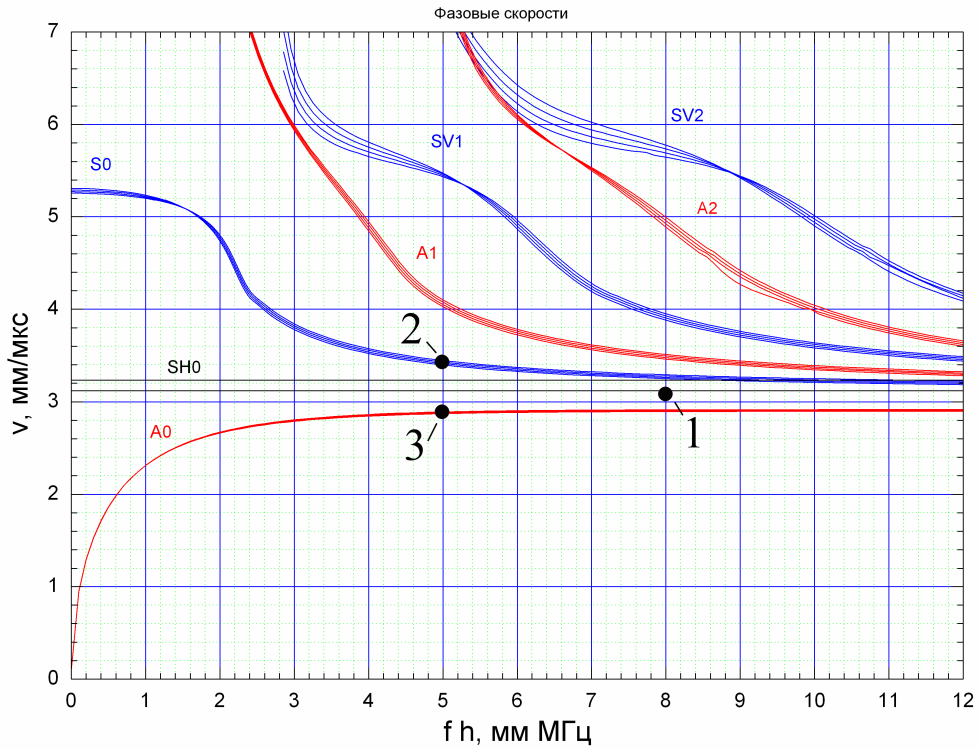


Рисунок 2.3 — Зависимости фазовых скоростей от толщины пластины и частоты (дисперсионные кривые)

скоростями. При толщине слоя менее  $2\lambda$ , чистая Рэлеевская волна «распадается», главным образом, на те же нормальные волны, но скорости их заметно отличаются (точки 2 и 3 на рисунке 2.3).

Распространяясь, волны  $S_0$  и  $A_0$  интерферируют одна с другой. Вблизи от излучателя, где разность фаз между ними близка к нулю, их суммарное акустическое поле подобно акустическому полю Рэлеевской волны ( $R$ ), поэтому описанную совокупность волн  $S_0$  и  $A_0$  можно назвать «квазирэлеевской» волной [55, 56].

Проведённые эксперименты на длинномерных ферромагнитных объектах, представляющих собой трубы различного диаметра и различной толщины с искусственными дефектами типа «пропил» на внешней поверхности трубы и сквозное сверление показали, что волну Рэлея можно успешно применять на объектах с толщиной стенки от 16 мм – выявлено единственное четкое отражение от каждого дефекта (рисунок 2.4в).

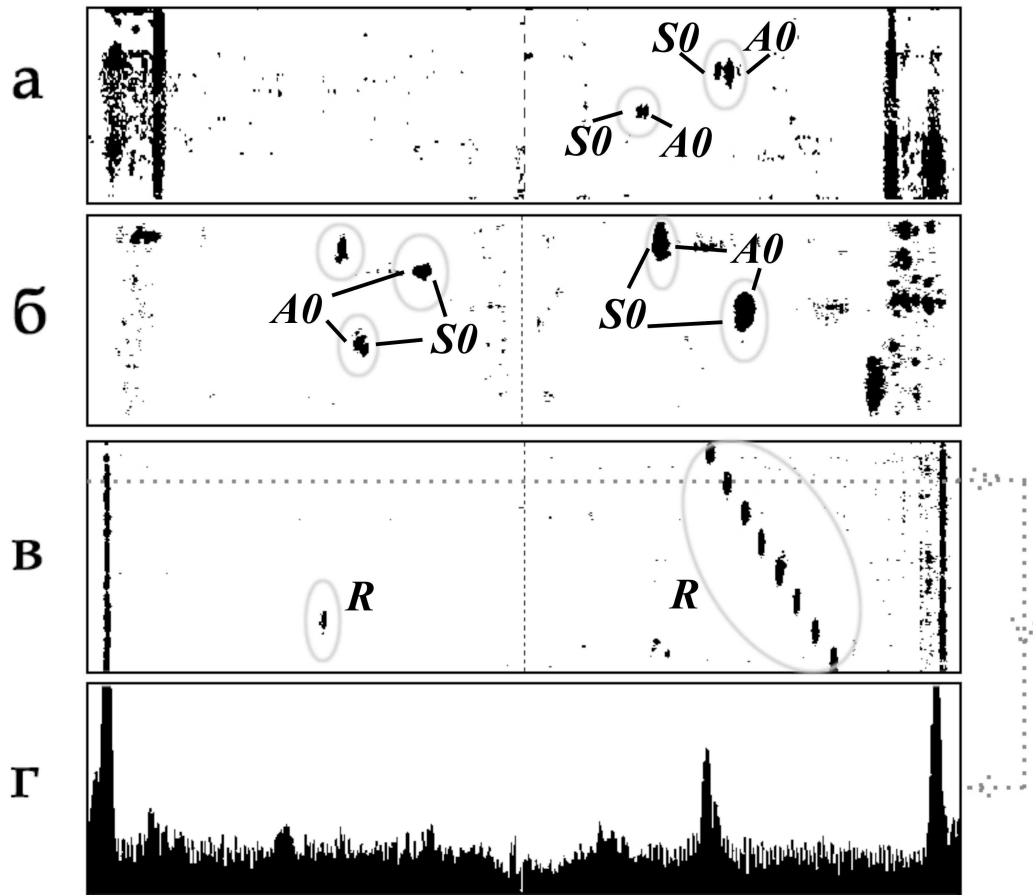


Рисунок 2.4 — Пример А-скана (г) и получаемые при обработке С-сканы труб с толщиной стенки 9 мм (а), 11 мм (б), 16 мм (в); дефекты на рисунках а, б, в отмечены серой рамкой

При толщине стенки 11 мм сигнал от дефекта начинает раздваиваться, и регистрируется квазирэлеевская волна (рис 2.4б). При толщине стенки менее 10 мм, моды  $S_0$  и  $A_0$  окончательно разделяются, и от одного дефекта регистрируются два сигнала (рисунок 2.4а). Эти волны, при известных их скоростях, также можно использовать при контроле объектов с толщиной стенки менее 11 мм.

### 2.3. Расчёт геометрических параметров первичных ЭМА преобразователей для выбранной ультразвуковой моды

Форма и количество витков первичного ЭМА преобразователя определяется конкретной постановкой задачи. Некоторые из наиболее распространённых типов катушек [44] показаны на рисунке 2.5. Они изготавливаются, как пра-

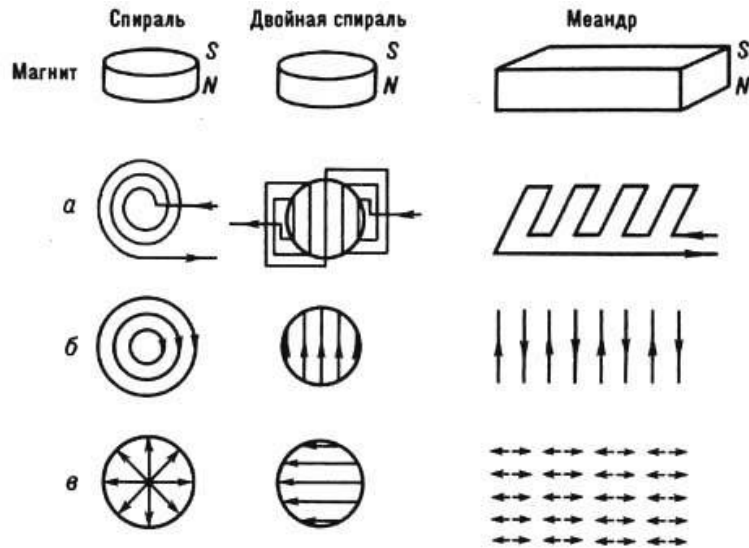


Рисунок 2.5 — Некоторые типы катушек (а), распределения переменного тока в скин-слое (б) и вызываемые индукционным механизмом ЭМА преобразования поля упругих смещений (в)

вило, путём намотки или укладки лакированного медного провода толщиной 20-100 мкм на каркас или подложку, причем количество витков катушки обратно пропорционально частоте генерации ультразвука. Так, на частотах, превышающих 1ГГц, достаточно одного витка, расположенного у поверхности металла.

Для волноводного ЭМА эхо-метода УЗК целесообразно использовать первичные ЭМА преобразователи, представляющие собой катушки в форме меандра, намотанные, для удобства изготовления, на оправки с прорезями, расстояние между которыми соответствует длине волны генерируемого ультразвука. Примеры оправок для различных длин волн приведены на рисунке 2.6.

Для расчёта геометрических характеристик первичных ЭМА преобразователей, необходимо оценить толщину стенки объекта контроля, по дисперсионным кривым (рисунок 2.3) определить частоту возбуждающего сигнала и фазовую скорость для выбранной моды ультразвуковой волны и рассчитать по формуле (1.3) её длину.

При соответствии длины периода меандра и длины ультразвуковой волны эффективность как прямого, так и обратного ЭМА преобразований будет максимальна. Например, при возбуждении моды  $SV_1$  на объектах контроля





Рисунок 2.6 — Оправки для намотки первичных ЭМА преобразователей в форме меандра с толщиной стенки 8 мм необходимо выбрать наиболее пологий участок (отрезок А-В на рисунке 2.3) на дисперсионной кривой, соответствующей данной моде. На этом участке выберем рабочую точку, в которой  $c_{\text{фаз}} = 5,8$  мм/мкс, а соотношение  $f \cdot h = 4$ , то есть  $f = 500$  кГц, а  $\lambda = 11,6$  мм. Тогда для возбуждения и приёма моды  $SV1$  волны Лэмба необходимо изготовить катушку в форме меандра с длиной периода порядка 12 мм и подать на неё возбуждающий сигнал с частотой 500 кГц. Параметры первичных ЭМА преобразователей для возбуждения мод  $SV1$  и  $SV2$  волны Лэмба и нормальной поперечной волны  $SH0$  приведены в таблице 2.1.

При изменении толщины стенки объекта контроля изменятся  $c_{\text{фаз}}$  и  $\lambda$ , поэтому необходимо, руководствуясь дисперсионными кривыми, заново выбрать частоту возбуждающего сигнала. Так, при изменении толщины объекта с 8 мм до 10 мм, необходимо снизить частоту с 500 кГц до 400 кГц, длина волны при этом увеличится с 11,6 мм до 14,5 мм. Использовать меандр с периодом 12 мм всё ещё можно, но соотношение сигнал/шум в таком случае уменьшится примерно в 2-3 раза.

Таблица 2.1 — Параметры первичных ЭМА преобразователей для возбуждения мод  $SV1$  и  $SV2$  волны Лэмба и нормальной поперечной волны  $SH0$

Мода	$f \cdot h$ , МГц·мм	$c_{фаз}$ , мм/мкс	Частота и длина волны	Толщина объекта $h$ , мм				
				8	10	12	14	16
$SV1$	4	5,8	$f$ , МГц	0,48	0,40	0,33	0,28	0,25
			$\lambda$ , мм	11,6	14,5	17,5	20,7	23,2
$SV2$	7,8	5,7	$f$ , МГц	0,97	0,78	0,65	0,56	0,48
			$\lambda$ , мм	5,8	7,3	8,8	10,2	11,9
Волна Рэля	7,8	3	$f$ , МГц	0,97	0,78	0,65	0,56	0,48
			$\lambda$ , мм	3,0	3,9	4,6	5,4	6,25
Волна Рэля	6	3	$f$ , МГц	0,75	0,6	0,5	0,43	0,37
			$\lambda$ , мм	4,0	5,0	6,0	6,9	8,1
$SH0$	4	3	$f$ , МГц	0,50	0,40	0,33	0,29	0,25
			$\lambda$ , мм	6,0	7,5	9,1	10,3	12,0

## 2.4. Конструкция однонаправленных первичных ЭМА

### преобразователей для многоканальной схемы сканирования

Первичные ЭМА преобразователи обычно изготавливаются методом ручной или полуавтоматической намотки, поэтому для удобства были изготовлены оправки из стеклотекстолита (рисунок 2.6). Прорези в оправках соответствуют основным значениям длин волн, согласно таблице 2.1. Для возбуждения и приёма волны Рэля была выбрана оправка с длиной волны 6 мм. Готовый к использованию первичный ЭМА преобразователь представлен на рисунке 2.7.

Принципиальная схема работы однонаправленных ЭМА преобразователей приведена на рисунке 2.8. Однонаправленные первичные ЭМА преобразователи представляют собой вложенные друг в друга катушки в форме меандра, период которого определяет длину запускаемой или принимаемой ультразвуковой волны, а, значит, и моду волн Лэмба и Рэля. Во внешнюю катушку 1 подаётся зондирующий импульс, который преобразуется в бегущую в обе стороны от катушки ультразвуковую волну. Во вложенную излучающую катушку 2 подаётся

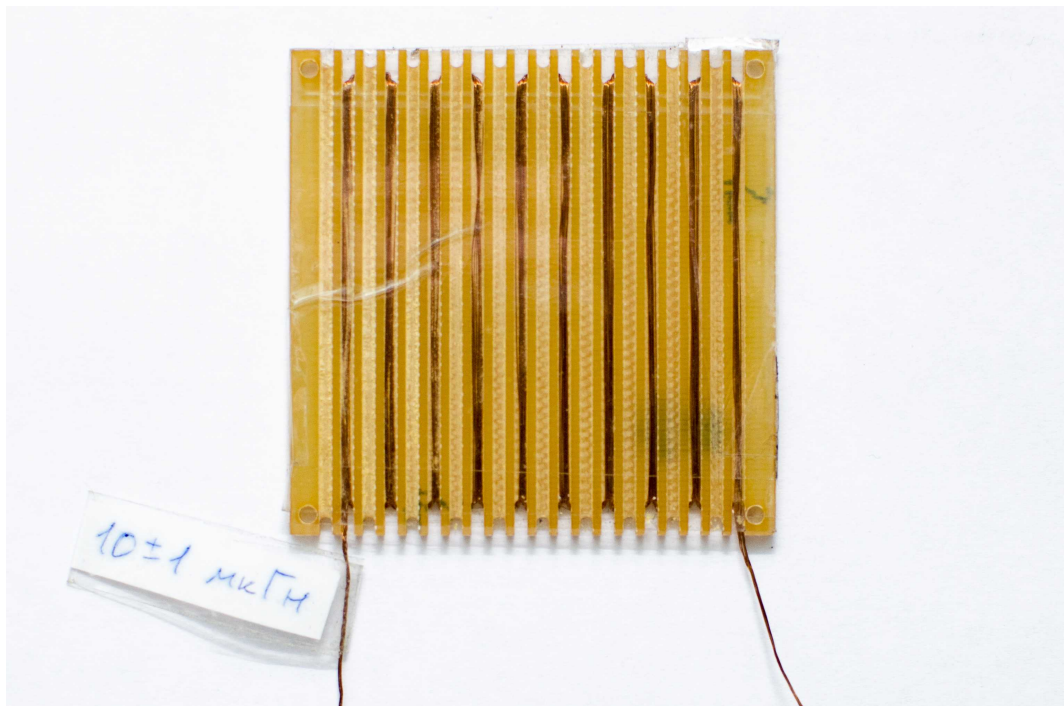


Рисунок 2.7 — Готовый к использованию первичный ЭМА преобразователь для возбуждения волны Рэлея

зондирующий импульс со сдвигом фазы в  $90^\circ$  относительно зондирующего импульса во внешней катушке 1.

Таким образом, при преодолении волной расстояния, равного четверти периода меандра (или длины запускаемой и принимаемой волны), она попадает под действие вложенной катушки 2, что даёт усиление сигнала в два раза для волны, бегущей в одну сторону от излучателя, и практически полное затухание волны, бегущей в другую сторону. Аналогично, сигнал с приёмных катушек сдвигается электроникой по фазе и складывается. Такая схема, кроме усиления сигнала и увеличения соотношения сигнал/шум, позволяет излучать и принимать сигнал только с одной стороны. Ультразвуковые волны с противоположной стороны от преобразователя будут фильтроваться, так как они рассогласованы по фазе с основной волной.

Для многоканальной схемы сканирования необходимо использовать два совмещённых ЭМА преобразователя: излучатель и приёмник. Для получения одного А-скана трубы необходимо сгенерировать ультразвуковую волну четыре

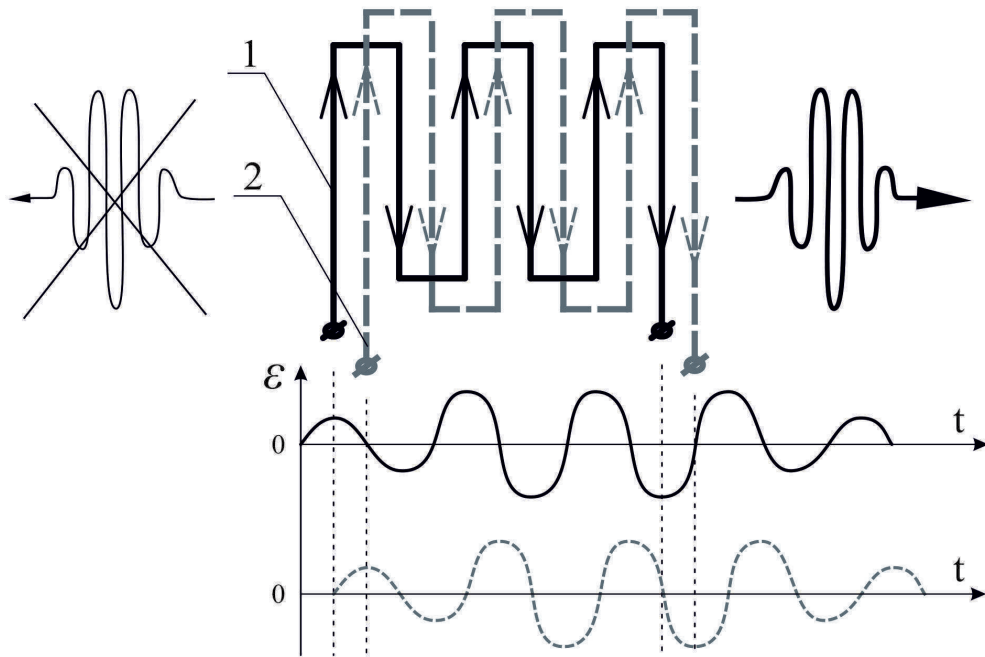


Рисунок 2.8 — Схема первичных однонаправленных ЭМА преобразователей:

1 – внешняя катушка, 2 – вложенная катушка

раза – с каждого из двух излучателей в обе стороны. Такой подход не только позволяет получить достоверные статистические данные, но и убирает мёртвую зону вблизи ЭМА преобразователей, а также сильно уменьшает помехи и увеличивает чувствительность волноводного ЭМА эхо-метода УЗК ко всем видам дефектов.

Практическое применение однонаправленных первичных ЭМА преобразователей было реализовано за счёт разработки и использования генератора зондирующих импульсов, электронная схема которого приведена в приложениях Г и Д.

## 2.5. Выводы к главе 2

1. Для контроля длинномерных объектов с толщиной стенки более 16 мм в наибольшей степени подходит поверхностная волна Рэлея. При толщине стенки менее 16 мм сигнал от дефекта начинает «раздваиваться», и регистрируется квазирэлеевская волна. При толщине стенки менее 10 мм

волна Рэлея окончательно разделяется на моды  $S_0$  и  $A_0$ , от одного дефекта регистрируются два сигнала. Эти волны, при известных их скоростях, также можно использовать для контроля объектов с толщиной стенки менее 16 мм.

2. Для повышения чувствительности ЭМА систем и избавления от мёртвой зоны вблизи от ЭМА преобразователей необходимо использовать однонаправленные вложенные первичные ЭМА преобразователи в форме меандра.

### 3. АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ ИЗ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

#### 3.1. Экспериментальное исследование зависимости эффективности возбуждения и приёма ультразвуковых волн ЭМА методом от величины поляризующего поля

Эксперименты по исследованию эффективности двойного ЭМА преобразования в зависимости от величины поляризующего поля проводились на установке, позволяющей создавать как параллельные, так и ортогональные по отношению к поверхности ферромагнетика постоянные магнитные поля с регулируемой амплитудой. Схема установки приведена на рисунке 3.1. Параллельное поверхности объекта контроля поляризующее поле создавалось с помощью П-образного электромагнита, на полюса которого была установлена стальная ферромагнитная плита. Для ортогонального намагничивания применялась система из постоянных магнитов, создающая в материале объекта контроля магнитную индукцию порядка 1,2 Тл при зазоре между намагничивающей системой и поверхностью ферромагнетика 10 мм. Первичные ЭМА преобразователи располагались на поверхности стальной плиты между полюсами электромагнита, а также в зазоре между системой из постоянных магнитов и поверхностью плиты.

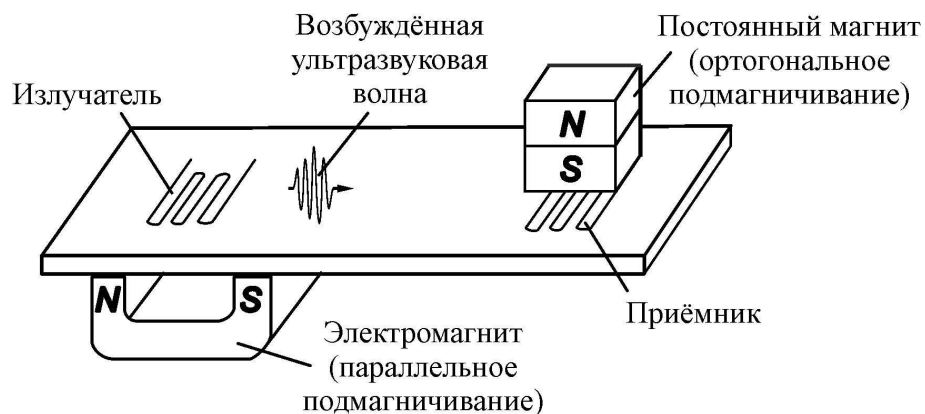


Рисунок 3.1 — Схема экспериментальной установки

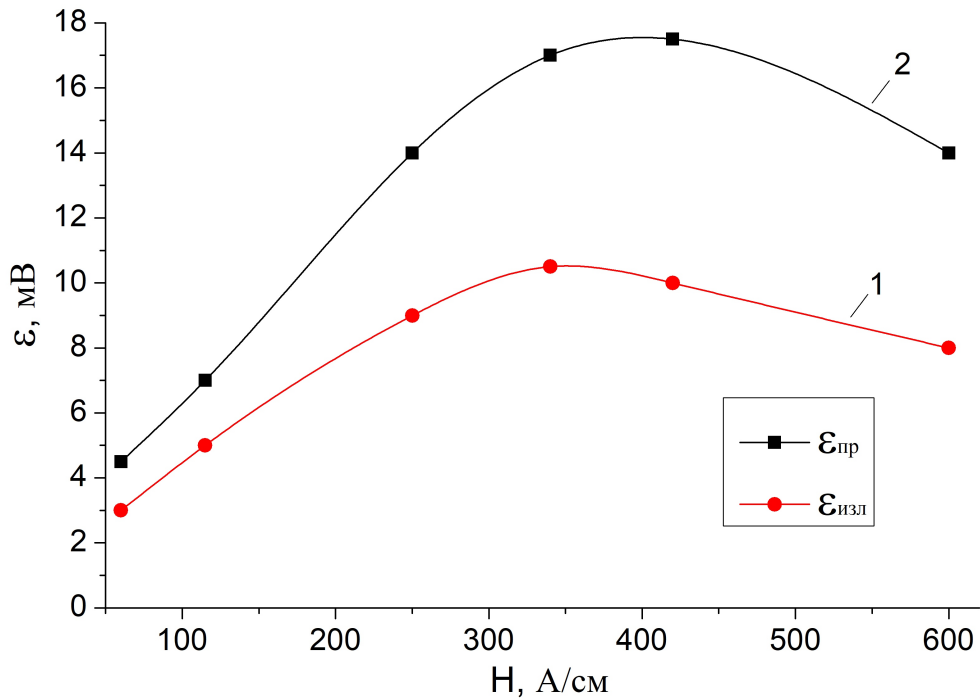


Рисунок 3.2 — Зависимость эффективности ЭМА преобразования от изменения параллельного поляризующего поля

На рисунке 3.2 представлена полученная экспериментальная зависимость эффективности ЭМА преобразования от изменения параллельного поляризующего поля. График 1 на рисунке 3.2 получен при помещении излучателя над электромагнитом, создающим параллельное поляризующее поле, а приёмник располагался под намагничивающей системой, создающей ортогональное поляризующее поле. Регулировка амплитуды параллельного поляризующего поля в этом эксперименте производилась изменением тока в обмотке электромагнита. При этом создаваемая системой из постоянных магнитов магнитная индукция оставалась постоянной (расстояние до поверхности пластины не изменялось) и составляла 1,2 Тл. График 2 на рисунке 3.2 получен при замене местами приёмного и излучающего первичных ЭМА преобразователей: излучатель располагался в ортогональном поляризующем поле, а приёмник в параллельном.

На рисунке 3.3 представлена зависимость эффективности ЭМА преобразования от изменения ортогонального поляризующего поля. Как и в предыдущем

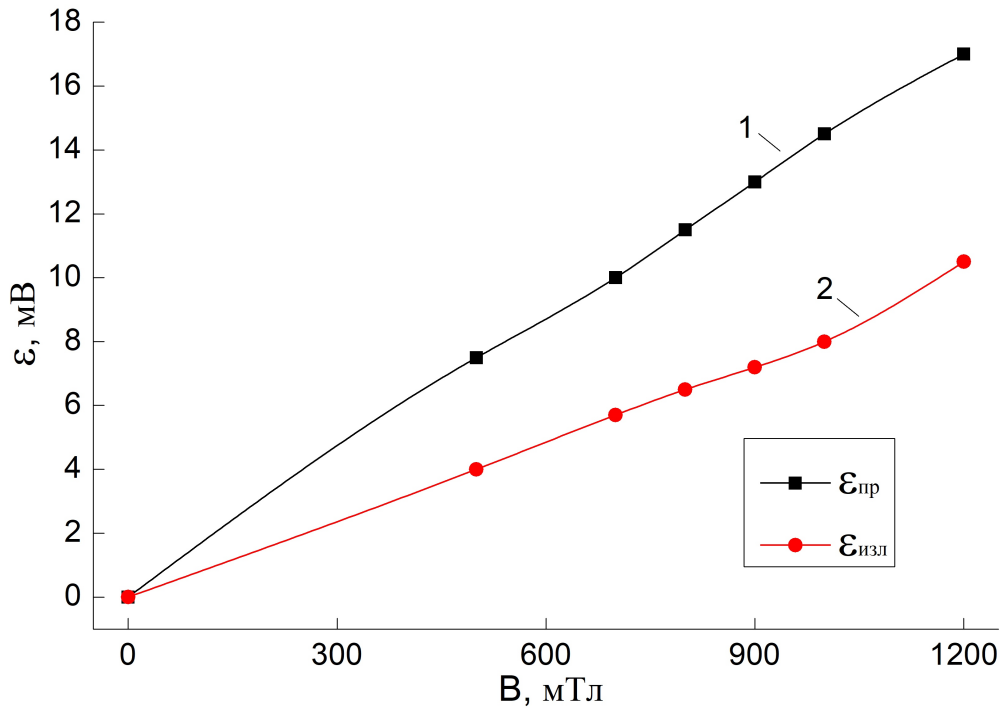


Рисунок 3.3 — Зависимость эффективности ЭМА преобразования от изменения ортогонального поляризующего поля

эксперименте, график 1 на рисунке 3.3 получен при помещении излучателя в параллельное поверхности ферромагнетика поляризующее поле. Приёмник располагался под системой из постоянных магнитов, создающей ортогональное поляризующее поле. Изменение величины ортогонального поляризующего поля производилось путём изменения зазора между системой из постоянных магнитов и поверхностью пластины. График 2 на рисунке 3.3 получен для случая, когда излучатель и приёмник менялись местами. Напряжённость параллельного поляризующего поля оставалась постоянной и равной 300 А/см.

Измерение амплитуды магнитного поля в процессе экспериментов производилось миллитесламетром в местах расположения первичных ЭМА преобразователей (приёмника и излучателя).

По результатам проведённых экспериментов можно сделать следующие выводы. Оптимальной амплитудой поля при параллельном намагничивании является величина 300 – 400 А/см. При напряжённости поля менее 250 А/см уровень сигнала падает более чем в 5 раз как при возбуждении, так и при приёме.



Для эффективного возбуждения и приёма ультразвуковых волн ЭМА методом при ортогональном намагничивании необходимо создать в материале ферромагнетика магнитную индукцию более 0,9 Тл. Полученные экспериментальные данные соответствуют данным, полученных авторами в работе [9] (рисунок 1.6).

### **3.2. Математическое моделирование намагничивающих систем ЭМА преобразователей**

Конструкция ЭМА преобразователей включает в себя намагничивающую систему, создающую поляризующее поле, необходимое для ЭМА преобразования. Под рабочей зоной понимается область, в которой происходит ЭМА преобразование, то есть в ней создаётся поляризующее поле и располагается первичный ЭМА преобразователь. Из таблицы 1.1 видно, что как для электродинамического, так и для магнитострикционного механизмов ЭМА преобразования обычно применяются П-образные постоянные магниты либо электромагниты.

При электродинамическом механизме первичные ЭМА преобразователи располагаются между полюсами электромагнита, а при электродинамическом механизме – в зазоре между полюсами П-образного магнита и поверхностью объекта контроля. Геометрические параметры П-образных магнитов для разных механизмов ЭМА преобразования существенно различаются. Для электродинамического механизма необходимо увеличить величину зазора между полюсами магнита и поверхностью объекта, увеличить поперечное сечение полюсов до размеров требуемой рабочей зоны (размеров первичных ЭМА преобразователей), а межполюсное расстояние можно уменьшить; при магнитострикционном механизме необходимо, чтобы межполюсное расстояние было достаточным для помещения в него первичных ЭМА преобразователей, поперечное сечение полюсов и величину зазора между полюсами магнита и поверхностью объекта контроля можно уменьшить.

Из вышесказанного следует, что П-образная намагничивающая система

требует определения геометрических и магнитных параметров для конкретного случая её использования. Расчёт магнитных и геометрических параметров П-образных намагничивающих систем аналитическим методом является нетривиальной задачей. Поэтому расчёт конструктивно более сложных систем с большой долей вероятности становится невозможным. Развитие в последнее время компьютерной техники, объединение ЭВМ в кластеры для создания больших вычислительных мощностей, а также появление мощных программных пакетов для численного моделирования магнитных полей, таких как ANSYS и Femm, позволяют рассчитать магнитные и геометрические параметры намагничивающей системы любой сложности.

### **3.3. Типовые схемы намагничивания**

В технике обычно применяются намагничивающие системы ЭМА преобразователей, представляющие собой либо постоянный магнит с вектором намагниченности, направленным по нормали к поверхности объекта контроля для электродинамического механизма ЭМА преобразования, либо П-образные постоянные магниты (или электромагниты) для магнитострикционного механизма ЭМА преобразования. Использование в автоматизированных ЭМА системах для диагностики длинномерных ферромагнитных объектов намагничивающих систем из постоянных магнитов предпочтительней, так как в этом случае снижается энергопотребление и решается задача удержания системы на поверхности ферромагнетика.

#### **3.3.1. Ортогональное подмагничивание**

**(электродинамический механизм ЭМА преобразования)**

Как было показано ранее, для эффективного ЭМА преобразования необходимо, чтобы намагничивающая система ЭМА преобразователя создавала магнитную индукцию порядка 2 Тл для ортогонального подмагничивания и напря-

жённость магнитного поля порядка 300 А/см для случая параллельного подмагничивания. Результаты моделирования в программных комплексах Femm и ANSYS показали, что создаваемое типовыми намагничивающими системами поляризирующее поле при толщине объекта контроля более 16 мм недостаточно для эффективного ЭМА преобразования. Так, намагничивающая система, представляющая собой одиночный постоянный магнит с направлением намагничивания, перпендикулярным к поверхности объекта контроля (рисунок 3.4), способна создавать магнитную индукцию, не превышающую 0,8-0,9 Тл при зазоре между намагничивающей системой и поверхностью объекта 10 мм. При этом размеры системы составляют 100×100×100 мм при массе порядка 8 кг.

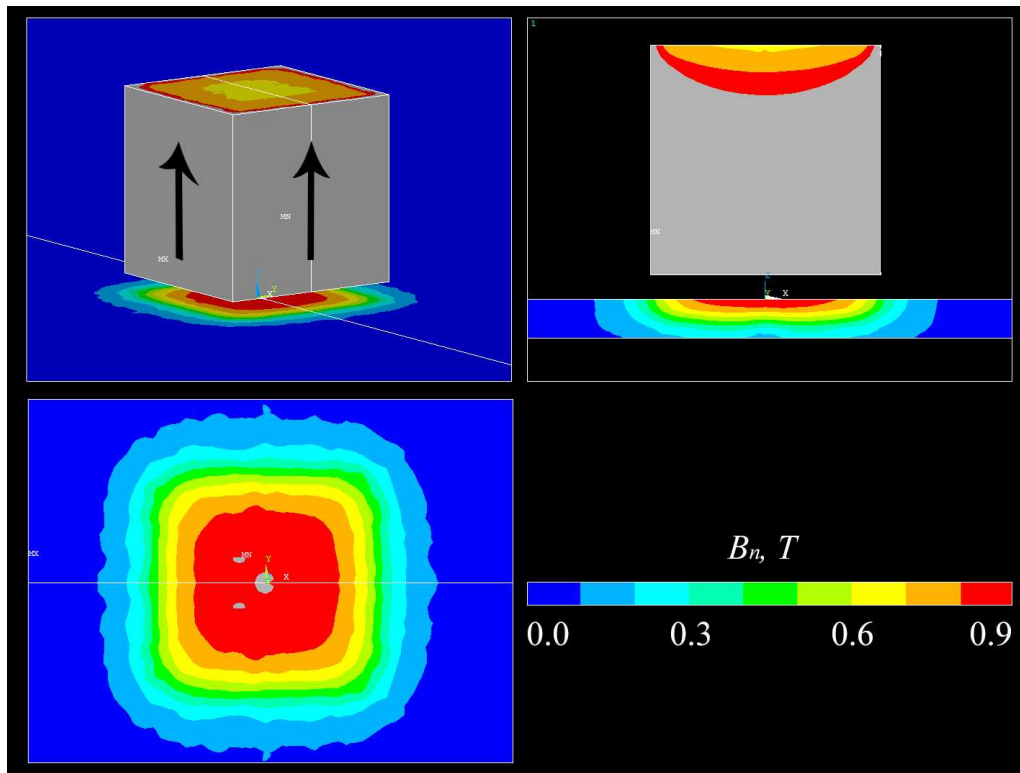


Рисунок 3.4 — Распределение нормальной составляющей магнитной индукции на поверхности объекта контроля в рабочей зоне постоянного магнита размерами 100×100×100 мм с вектором намагниченности, направленным по нормали к объекту контроля

При попытке уменьшить размеры системы либо падает величина магнитной индукции, либо существенно уменьшаются размеры рабочей зоны: в максимальном и однородном поле находится лишь малая часть первичного ЭМА

преобразователя (рисунок 3.5).

Если рассматривать П-образный магнит (рисунок 3.6), то при той же массе он создаёт при зазоре 10 мм ещё меньшую магнитную индукцию, направленную по нормали к поверхности намагничиваемого объекта, поэтому для электродинамического способа ЭМА преобразования П-образный магнит подходит в наименьшей степени.

### **3.3.2. Параллельное подмагничивание**

#### **(магнитострикционный механизм ЭМА преобразования)**

Для параллельного подмагничивания также можно использовать одиночный магнит, направление поляризации магнита параллельно поверхности объекта контроля. Результаты моделирования одиночного магнита размерами  $100 \times 200 \times 45$  и массой порядка 8 кг представлены на рисунке 3.7.

Анализ рисунка показывает, что максимальное значение тангенциальной составляющей магнитного поля в рабочей зоне намагничивающей системы не превышает 20 А/см. При этом поле существенно неоднородно и использовать такую намагничивающую систему для ЭМА преобразователей малоэффективно.

На рисунке 3.8 представлен расчёт П-образной намагничивающей системы из постоянных магнитов, масса системы составляет порядка 6 кг. Межполюсное расстояние составляет 60 мм, оно было выбрано исходя из размеров первичных ЭМА преобразователей для возбуждения и приёма волн Лэмба и Рэлея. Поле в рабочей зоне намагничивающей системы достаточно однородно, но значение напряжённости магнитного поля не превышает 10 А/см.

Таким образом, для ортогонального подмагничивания объекта контроля с толщиной стенки более 16 мм можно использовать намагничивающую систему, представляющую собой одиночный магнит с направлением поляризации, перпендикулярным к поверхности объекта контроля, но такая система будет обладать большой массой и недостаточным для максимально эффективного

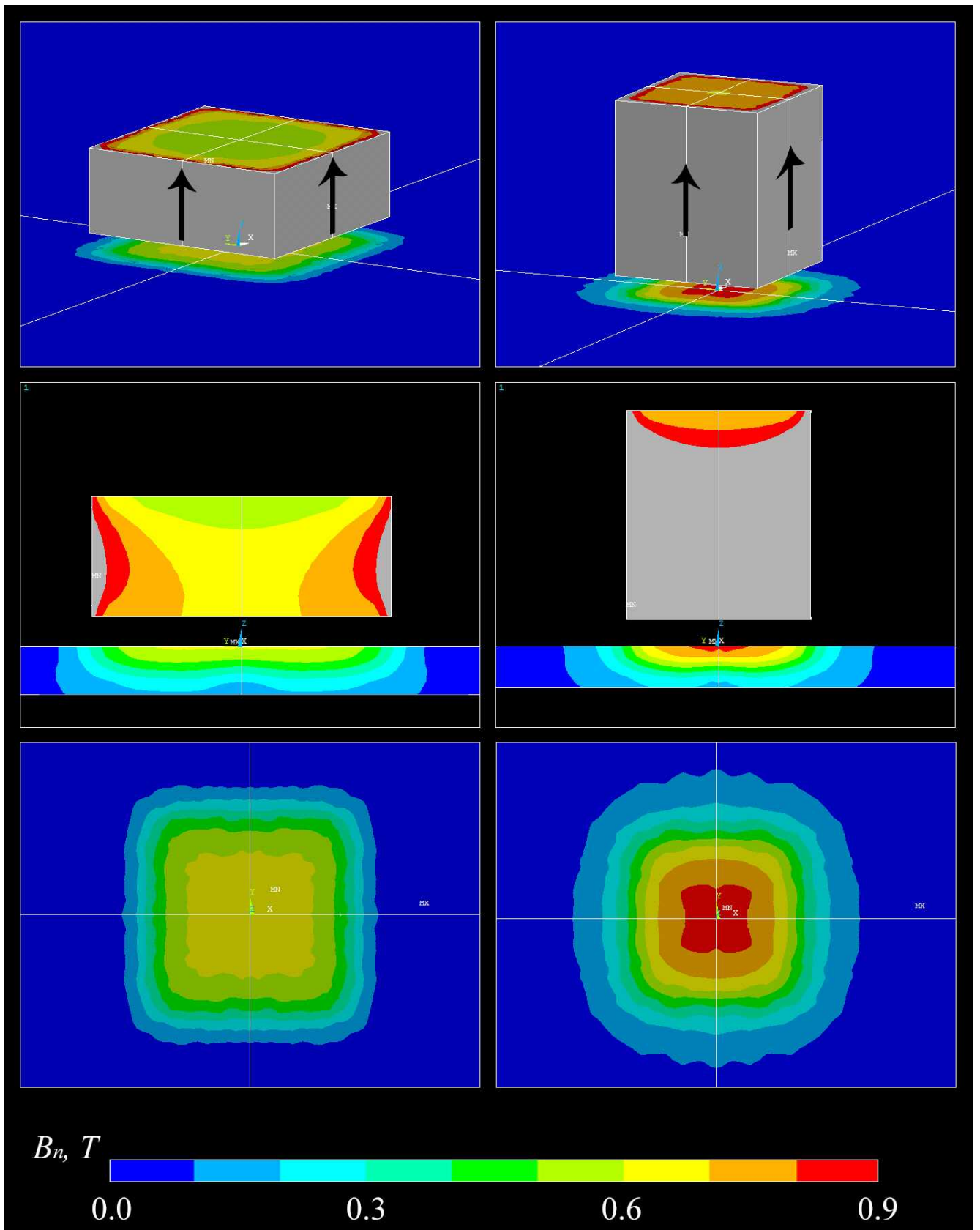


Рисунок 3.5 — Распределение нормальной составляющей магнитной индукции на поверхности объекта контроля в рабочих зонах постоянных магнитов размерами 100×100×40 мм и 70×70×80 мм с векторами намагниченности, направленными по нормали к объекту контроля

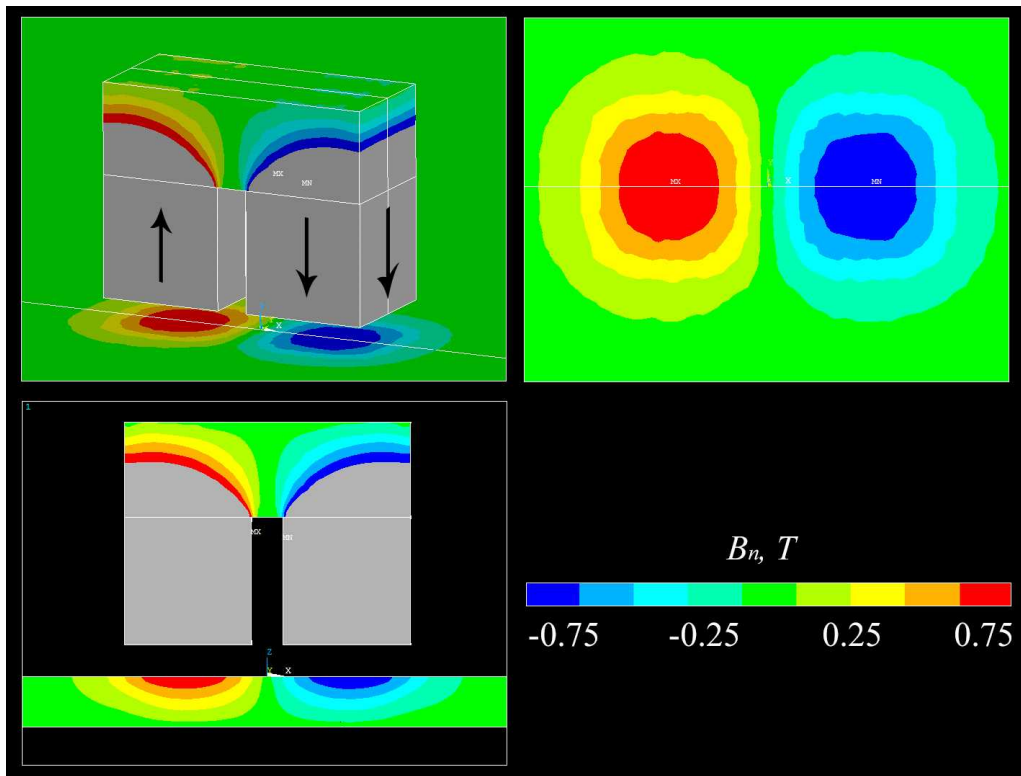


Рисунок 3.6 — Распределение нормальной составляющей магнитной индукции на поверхности объекта контроля в рабочих зонах постоянного П-образного магнита

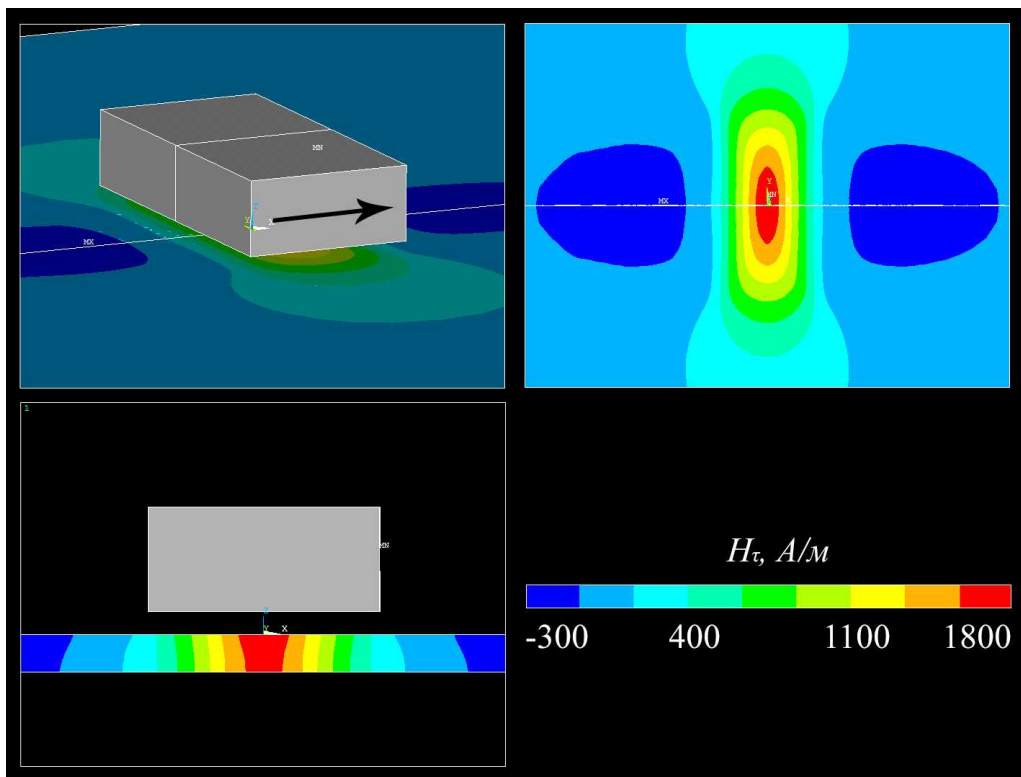


Рисунок 3.7 — Распределение тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля от намагничивающей системы, представляющей собой одиночный магнит с размерами  $100 \times 200 \times 45$  мм

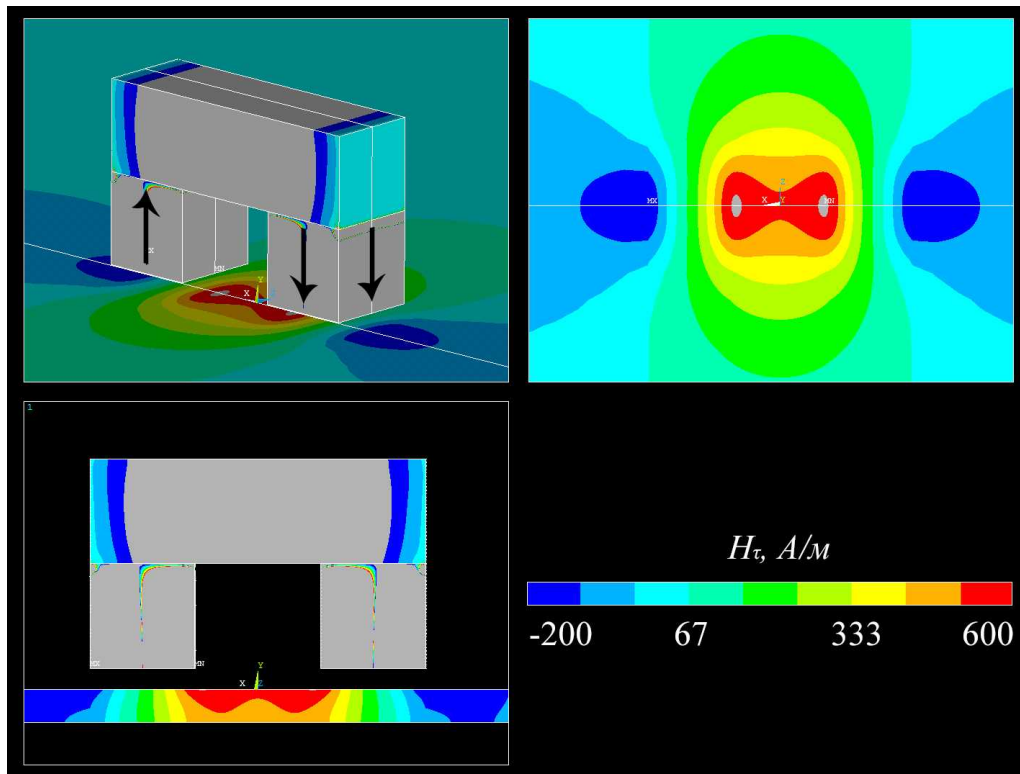


Рисунок 3.8 — Распределение тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля от П-образной системы из постоянных магнитов

ЭМА преобразования поляризующим полем. Применение типовых намагничивающих систем из постоянных магнитов для параллельного подмагничивания объектов с толщиной стенки более 16 мм не является целесообразным ввиду того, что они не способны обеспечить напряжённость магнитного поля 300 А/см без существенного увеличения массы намагничивающей системы.

### 3.4. Оптимизация геометрических и магнитных параметров системы типа П-образный постоянный магнит

Для решения задачи создания ортогонального и параллельного поляризующего поля на объектах контроля с толщиной стенки более 16 мм с помощью П-образной намагничивающей системы из постоянных магнитов была проведена серия расчётов в система ANSYS. Геометрия и размеры намагничивающей системы были оптимизированы с целью минимизации её массы при достижении оптимальной величины параллельного и ортогонального поляризующих полей.

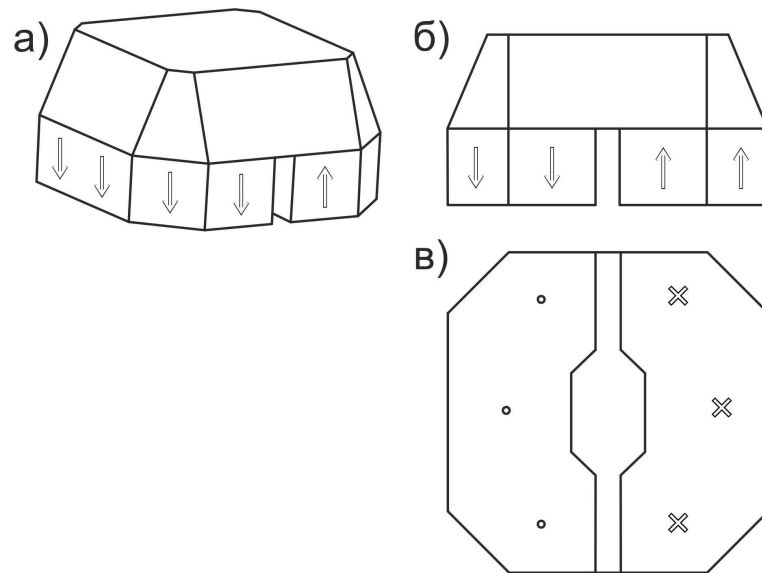


Рисунок 3.9 — Внешний вид оптимизированной П-образной намагничивающей системы:  
а – трёхмерное представление, б – вид сбоку, в – вид снизу

На рисунке 3.9 приведён внешний вид модели П-образной намагничивающей системы. Система состоит из двух полюсов, выполненных из современных постоянных магнитов, а также включает в себя ярмо из магнитомягкого материала (пермендюр). Направления поляризации магнитов показаны стрелками на рисунке 3.9.

Такую намагничивающую систему можно использовать как для магнито-стрикционного (параллельное поверхности ферромагнетика магнитное поле), так и для электродинамического (ортогональное магнитное поле) механизмов ЭМА преобразования. Результаты расчётов и оптимизации представлены на рисунке 3.10. Рабочая область отмечена на рисунке 3.10 рамкой.

Тангенциальная по отношению к поверхности ферромагнетика составляющая напряжённости магнитного поля в рабочей области между полюсами П-образного магнита для данной намагничивающей системы составляет порядка 350 А/см (рисунок 3.10а). Нормальная составляющая индукции в зазоре между полюсом П-образного магнита и поверхностью ферромагнетика составляет порядка 1 Тл (рисунок 3.10б). При этом масса системы составляет 15 кг. Величина таких поляризующих полей достаточна для эффективного возбуж-



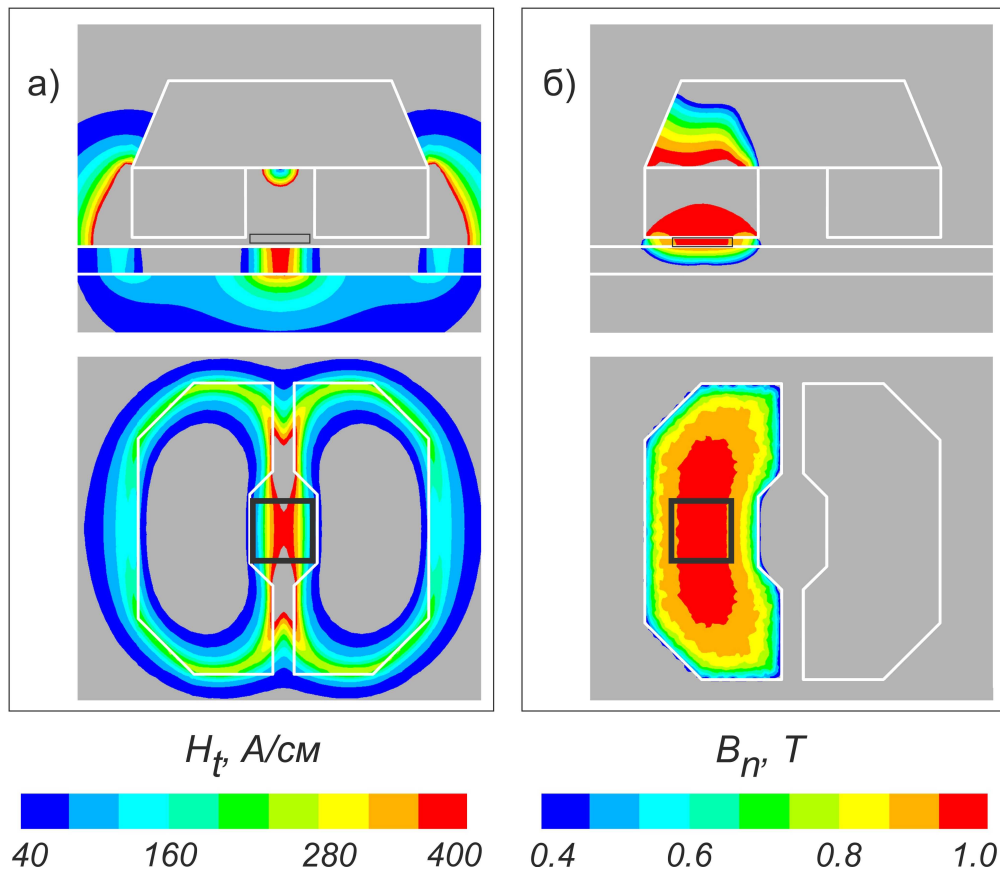


Рисунок 3.10 — Распределения магнитного поля от П-образной намагничивающей системы:  
 а - распределение тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля  $H_t$ ,  
 вид сбоку и сверху; б - распределение нормальной составляющей индукции  $B_n$ ,  
 вид сбоку и сверху

дения и приёма ультразвука в металлах, но большая масса намагничивающей системы затрудняет её применение в ручных и автоматизированных средствах ЭМА диагностики.

### 3.5. Создание сильных магнитных полей с помощью современных постоянных магнитов

В последнее время в литературе [57–65] часто можно встретить термин «сильные магнитные поля». Под сильными магнитными полями авторы работ понимают такие поля, напряжённость  $H$  которых превышает индукцию насыщения  $B_m$  материала магнита:  $H > B_m = 4\pi M_s$ . Магнитная индукция сильных полей может существенно превышать 4 Тл, что существенно превосходит

индукцию насыщения феррита и любого известного на сегодняшний день ферромагнитного материала. Кроме того, при индукции, превышающей индукцию насыщения феррита, образец намагничивается до насыщения независимо от его формы (от размагничивающего фактора).

Ещё относительно недавно получение таких высоких полей было возможно только при помощи сверхпроводящих или охлаждаемых соленоидов. Однако открытия в области новых магнитных материалов, основанных на редкоземельных металлах, позволили создать намагничивающие системы с сильными магнитными полями. Основной отличительной чертой таких намагничивающих систем является неколлинеарное расположение магнитов – поля от постоянных магнитов, направленных встречно, накладываются друг на друга и суммируются, при этом магниты не разрушаются и не размагничиваются. Этот эффект стал возможен благодаря гигантской магнитной анизотропии современных постоянных магнитов – коэрцитивная сила по намагниченности у современных постоянных магнитов может составлять более  $2,6 \cdot 10^6$  А/м.

Более подробно метод создания сильных магнитных полей описан в работе К. Хальбаха [57]. Суть метода заключается в расположении постоянных магнитов вокруг центрального объёма пространства, в котором «концентрируется» поле, и в нахождении таких направлений поляризации постоянных магнитов, при которых поле в заданном объёме пространства будет максимальным (рисунок 3.11).

Согласно [66] оптимальное направление поляризации каждого магнита можно вычислить из уравнения:

$$B_z = \left( \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \right) \cdot M \cdot (2\cos\theta\cos\phi + \sin\theta\sin\phi), \quad (3.1)$$

где:  $B_z$  – результирующая магнитная индукция, Тл, создаваемая магнитом, с направлением поляризации в соответствии с рисунком 3.12.

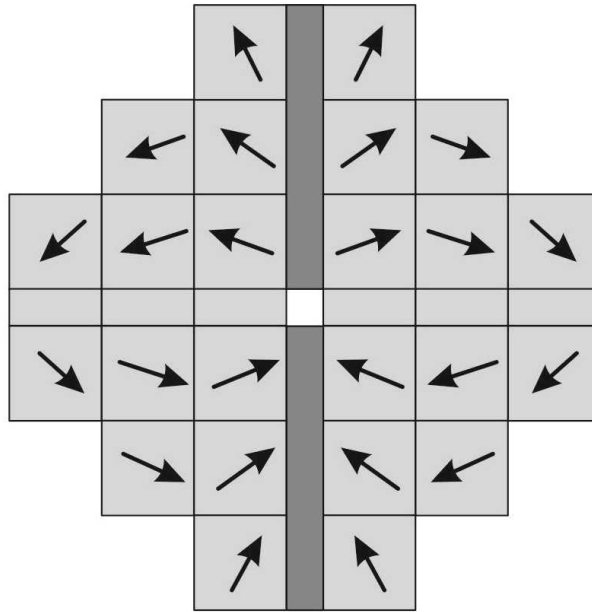


Рисунок 3.11 — Схема намагничивающей системы, создающей индукцию 4,5 Тл  
(стрелками указаны направления поляризации магнитов)

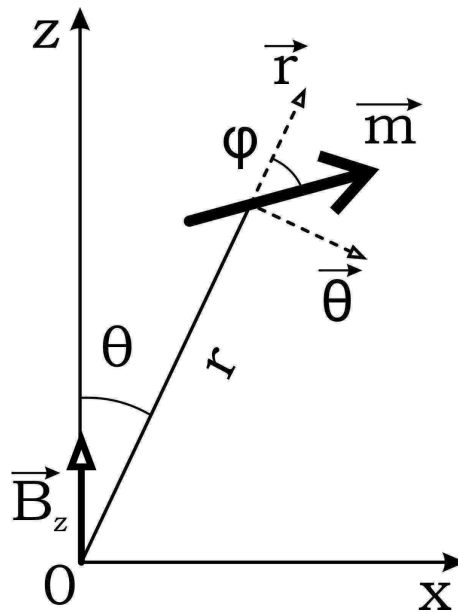


Рисунок 3.12 — Вклад магнитного момента  $\vec{m}$  в поле  $B_z$  в центральной точке  $O$

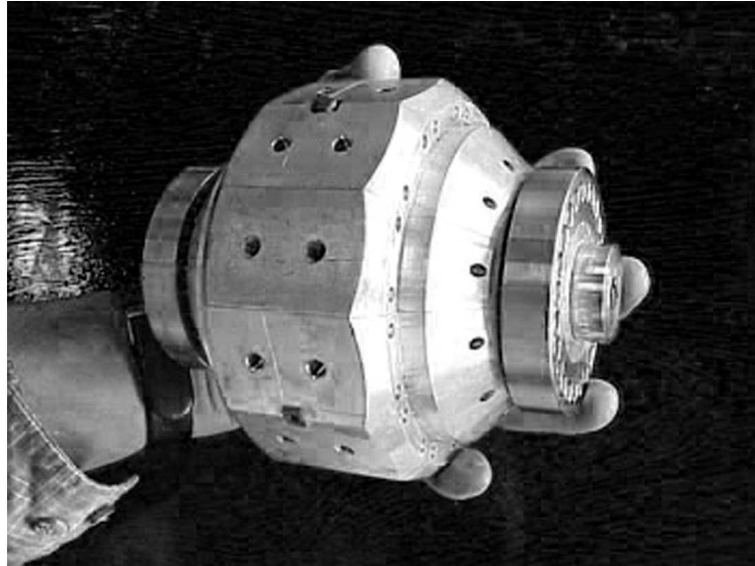


Рисунок 3.13 — Внешний вид намагничивающей системы, создающей индукцию 4,5 Тл

Тогда результирующая магнитная индукции  $B_z$  будет максимальна при

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{1}{2}\operatorname{tg}\phi. \quad (3.2)$$

Авторы работ [58, 65] успешно применили этот способ концентрации магнитного поля для своих задач. В работе [58] показана закрытая замкнутая система типа сферы Хальбаха (рис 3.13).

Система создаёт в локальной области магнитную индукцию более 4,5 Тл. Направление поляризации каждого магнита в этой системе выбиралось исходя из условия, что такая поляризация даёт максимально возможное вертикальное поле в центральной точке намагничивающей системы.

### **3.6. Определение оптимальных геометрических и магнитных параметров неколлинеарной намагничивающей системы с ортогональным постоянным поляризующим полем**

Намагничивающая система для ЭМА преобразователя должна создавать поляризующее поле на поверхности стальной пластины (или трубы) и располагаться на расстоянии 8 – 10 мм от поверхности. Таким образом, от намагни-

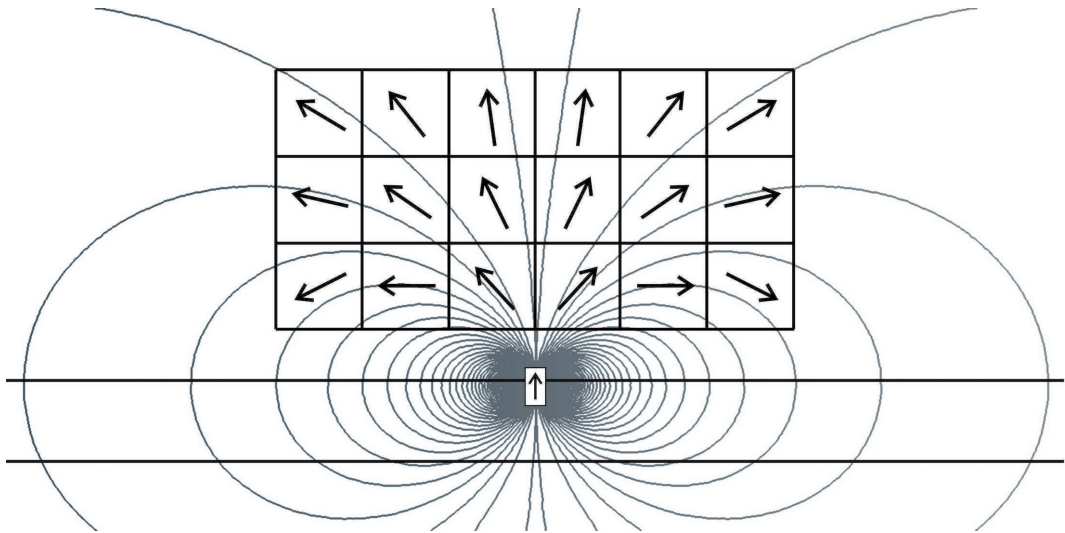


Рисунок 3.14 — Направления поляризации магнитов, выстроенные вдоль силовых линий диполя

чивающей системы, показанной на рисунке 3.11, можно использовать только половину (например, верхнюю), расположив её на расстоянии 8 – 10 мм от поверхности стальной пластины. Но в таком случае направление поляризации каждого магнита уже не будет оптимальным. Уравнение (3.2) – это не что иное, как уравнение силовых линий от точечного диполя [67]. Действительно, поле вдоль силовой линии больше поля вдоль любого другого направления. Таким образом, если в точке, где предполагается создать максимальное поле, поместить точечный диполь с поляризацией вдоль создаваемого поля, то силовые линии этого диполя укажут оптимальное направление поляризации магнитов, которые создают необходимое поле (рисунок 3.14).

На рисунке 3.15 показано распределение магнитного поля от намагничивающей системы с оптимальными направлениями поляризации магнитов. Результаты получены в программе Femm 4.2.

Как видно из рисунка, такая намагничивающая система способна намагнитить материал ферромагнетика до индукции, превышающей 2 Тл.

Необходимо учесть, что индукция в центральных магнитах также превышает 2 Тл, поэтому велика вероятность их размагничивания, и в реальном изделии необходимо использовать магниты с высокой коэрцитивной силой по на-

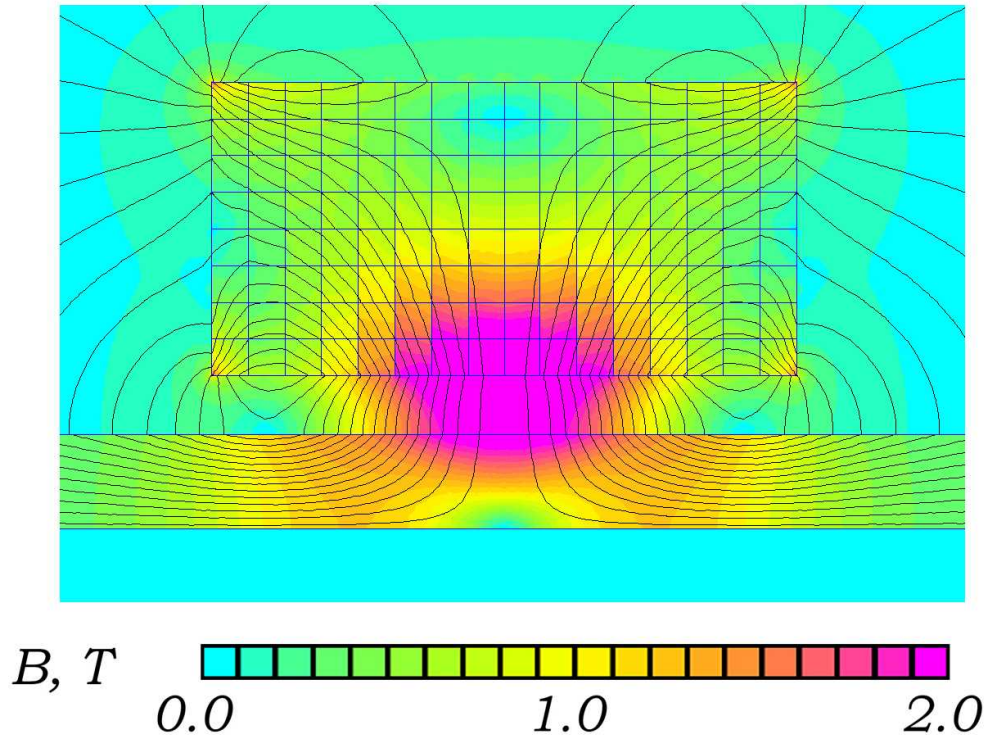


Рисунок 3.15 — Распределение магнитного поля от «идеальной» намагничивающей системы с оптимальными направлениями поляризации магнитов

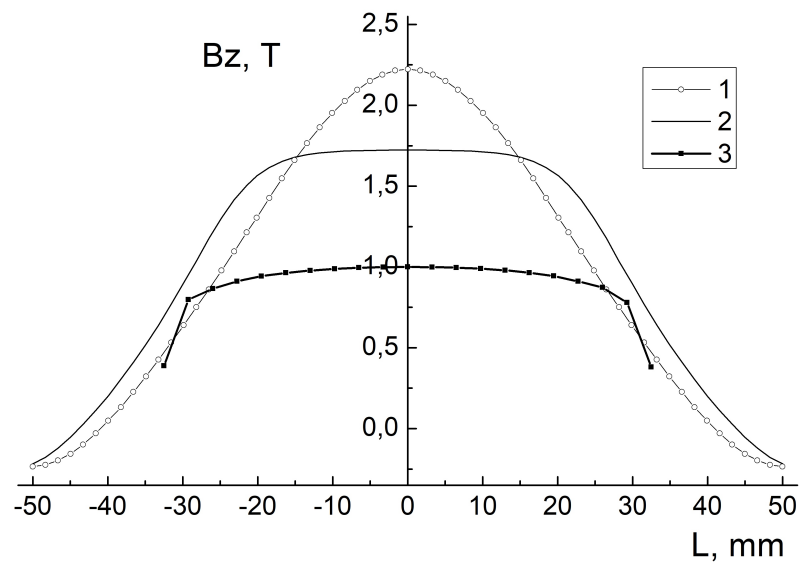


Рисунок 3.16 — Распределение нормальной составляющей индукции по отношению к поверхности объекта контроля в рабочих областях намагничивающих систем, границы рабочих областей показаны пунктирными линиями:

1 – «идеальная» намагничивающая система (рисунок 3.15); 2 – упрощенная намагничивающая система (рисунок 3.17); 3 – П-образная намагничивающая система (рабочая область располагается под полюсом)

магнитности. На рисунке 3.16 кривая 1 показывает распределение нормальной составляющей индукции в ферромагнетике в рабочей области под идеальной намагничивающей системой (рисунок 3.15а). Пунктирными линиями обозначена граница рабочей зоны, в которой располагаются первичные ЭМА преобразователи (40×40 мм).

Из графика видно, что магнитная индукция, создаваемая такой намагничивающей системой, составляет порядка 2 Тл. Таким образом, данная намагничивающая система подходит для оптимального возбуждения и приёма ультразвуковых волн в металлах. Но изготовить такую систему довольно сложно: необходимы десятки видов магнитов с различными направлениями поляризации и сложные оправки для сборки. Путём последовательного уменьшения количества элементов и усреднения направлений поляризации магнитов в каждом элементе была получена система, показанная на рисунке 3.17. Зависимость нормальной составляющей индукции в ферромагнетике от расстояния до центра намагничивающей системы демонстрирует кривая 2 на рисунке 3.16.

Как видно из рисунков, индукция в рабочей области под такой намагничивающей системой составляет 1,55 Тл, а поле достаточно однородно. Для сравнения, кривая 3 на рисунке 3.16 показывает зависимость нормальной составляющей индукции в ферромагнетике от расстояния до центра полюса П-образного магнита, показанного на рисунках 3.9 и 3.10. Вес упрощённой намагничивающей системы составляет 3 кг, а простота конструкции открывает большие возможности для промышленного изготовления.

### **3.7. Экспериментальная проверка эффективности оптимизированной намагничивающей системы с ортогональным постоянным поляризирующим полем**

Намагничивающая система, аналогичная показанной на рисунке 3.17, была изготовлена из магнитов прямоугольной формы. Магнитная система представ-

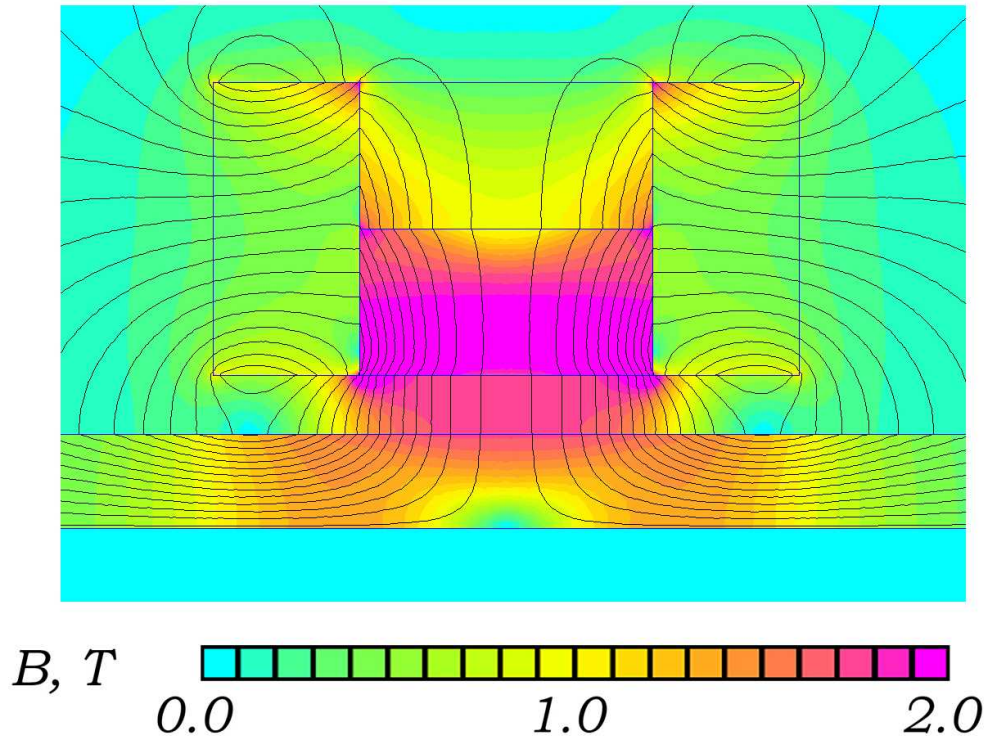


Рисунок 3.17 — Распределение магнитного поля от упрощенной намагничивающей системы, пригодной для промышленного изготовления

ляет собой сердечник из магнитомягкого материала (пермендюр) кубической формы  $40 \times 40 \times 40$  мм, окружённый со всех сторон, за исключением рабочей, постоянными высокоэнергетичными магнитами так, что направления поляризации магнитов были направлены внутрь сердечника. Схема и фотография системы представлены на рисунках 3.18 и 3.19, соответственно. Размеры системы составляют  $90 \times 90 \times 40$  мм, а вес без оправки не превышает 2,8 кг. Магнитное поле в рабочей области достигает 1,3 Тл, что хорошо согласуется с расчётами.

Таким образом, для ЭМА преобразователей с ортогональным подмагничиванием можно использовать неколлинеарную конфигурацию современных постоянных магнитов. Такая конфигурация позволяет снизить массу намагничивающей системы ЭМА преобразователя до 3 кг, при этом эффективность ЭМА преобразования с использованием этой намагничивающей системы будет превосходить эффективность с использованием П-образной системы.



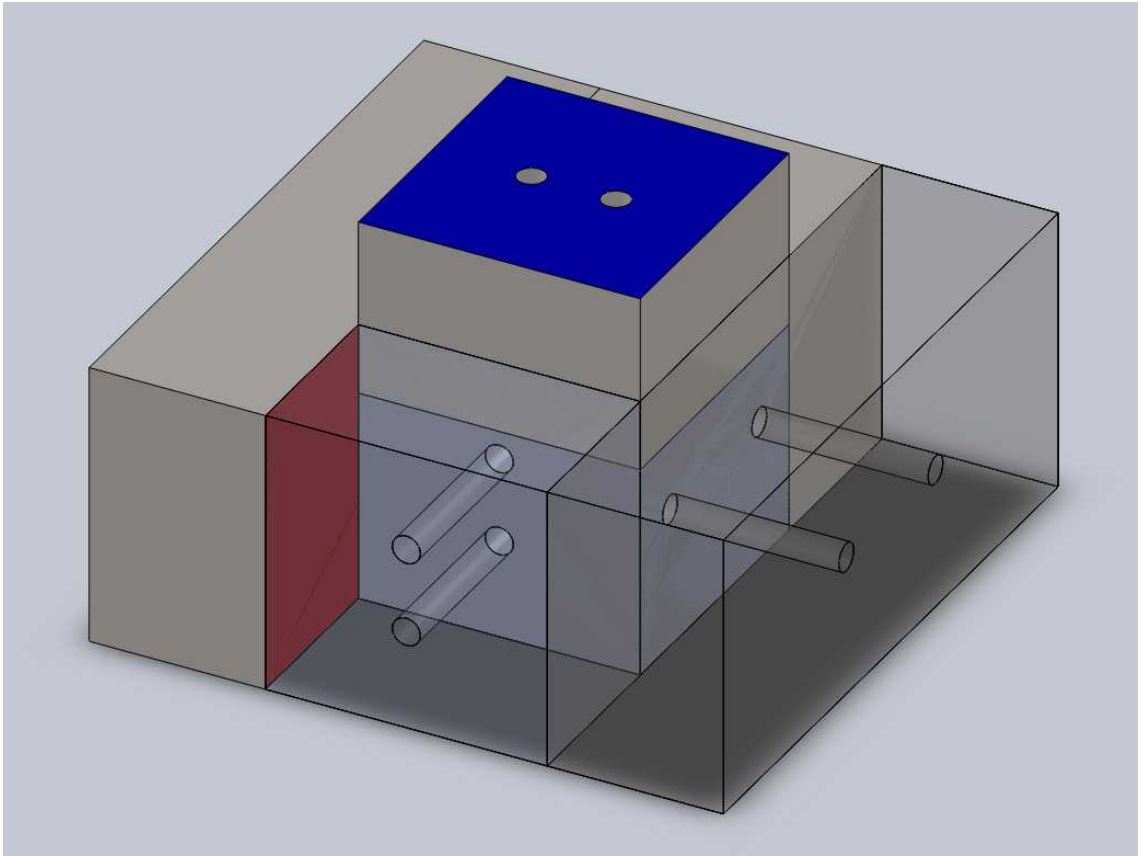


Рисунок 3.18 — Схема реальной намагничивающей системы ЭМА преобразователя

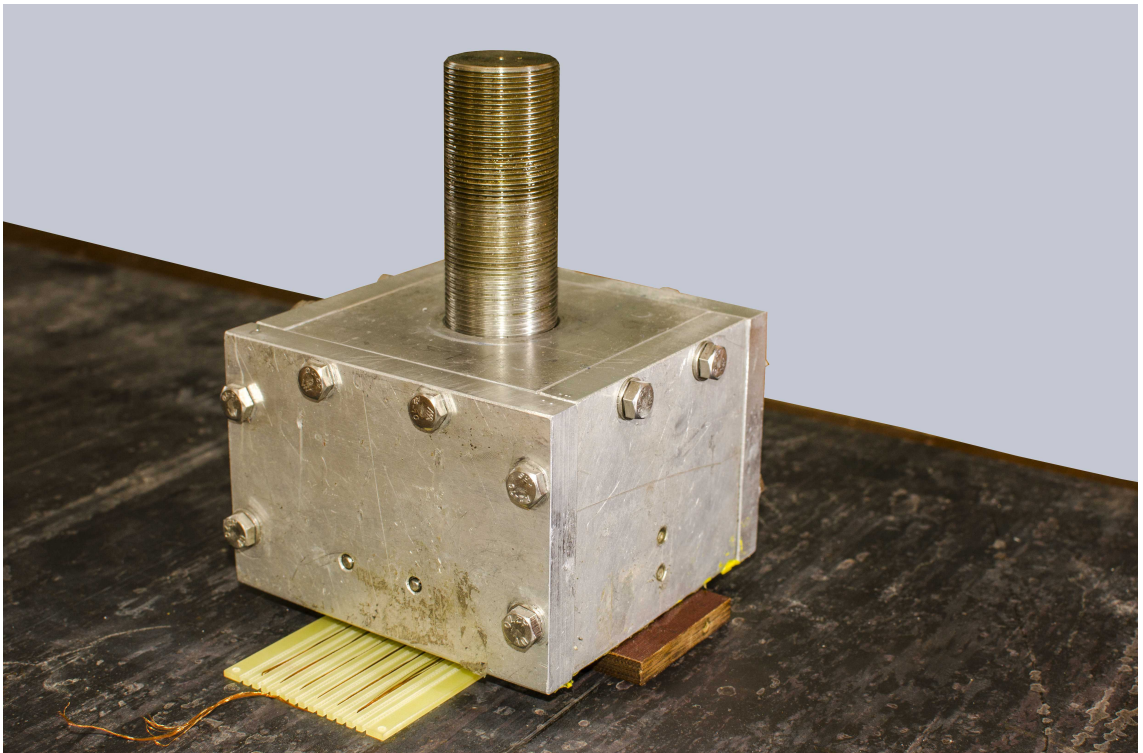


Рисунок 3.19 — Фотография реальной намагничивающей системы ЭМА преобразователя

### 3.8. Выводы к главе 3

1. Установлено что типовые намагничивающие системы ЭМА преобразователей обладают неоптимальными, завышенными значениями массогабаритных характеристик и силами магнитного притяжения к ферромагнитному объекту контроля. Кроме этого, они не обеспечивают создания в материале ферромагнетика необходимого для эффективного ЭМА преобразования поляризующего поля.
2. Для ортогонального подмагничивания целесообразно использовать намагничивающие системы из постоянных магнитов, построенные по принципу неколлинеарного расположения постоянных магнитов с гигантской магнитной анизотропией, для параллельного – альтернативные способы создания поляризующего поля, например импульсное намагничивание.
3. На основании численного моделирования и экспериментальных исследований предложена конструкция намагничивающего устройства, основанная на неколлинеарной конфигурации постоянных магнитов и позволяющая получить ортогональное к поверхности ферромагнетика однородное магнитное поле во всей рабочей области ЭМА преобразователя. При этом в ферромагнетике вне зависимости от его толщины возможно создание магнитной индукции до 2 Тл при массе намагничивающей системы не более 3-х кг, что обеспечивает почти десятикратное увеличение соотношения сигнал/шум при генерации и приёме ультразвуковых волн ЭМА методом по сравнению с типовыми намагничивающими системами.

#### **4. НАМАГНИЧИВАЮЩАЯ СИСТЕМА С ИМПУЛЬСНЫМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ПОЛЯРИЗУЮЩИМ ПОЛЕМ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ ЭМА СПОСОБОМ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ И ПЛАСТИН ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТАЛЕЙ**

##### **4.1. Трудности создания параллельного поляризующего поля при дефектоскопии толстостенных ферромагнетиков**

Намагничиванию толстостенных ферромагнетиков до технического насыщения параллельным поверхности магнитным полем с помощью приставных П-образных намагничивающих систем посвящено множество работ [48]. Основную проблему представляет собой растекание магнитного потока по всей толщине ферромагнетика и снижение по этой причине напряжённости магнитного поля в рабочей зоне намагничивающей системы, расположенной между полюсами П-образного магнита вблизи поверхности объекта контроля. Существующие способы концентрации магнитного потока путём уменьшения межполюсного расстояния, а также применения полюсов специальной формы приносят свои результаты только для объектов с толщиной стенки до 10 мм [48]. При помещении таких намагничивающих систем на толстостенный ферромагнетик необходимо увеличить массу постоянных магнитов, либо мощность, если используется приставной П-образный электромагнит. Конструкция и габариты намагничивающих систем зависят от конкретных задач, а масса может составлять при этом десятки килограммов.

Использование таких намагничивающих систем для неразрушающего контроля ферромагнетиков ЭМА способом создаёт дополнительный ряд сложностей: из-за сильного притяжения намагничивающей системы к ферромагнетику усложняются процесс использования диагностической аппаратуры и процесс сканирования, а также увеличивается вероятность поломки ЭМА преобразо-

вателей и травмоопасность для персонала. Эти проблемы можно преодолеть, если использовать в качестве намагничивающей системы ЭМА преобразователя импульсный электромагнит.

#### **4.2. Технология импульсного подмагничивания**

Технология импульсного подмагничивания появилась в конце XX века, и используется, как правило, для производственного контроля в стационарных установках. Её применение в мобильных и ручных устройствах для неразрушающего контроля ограничивалось высокими требованиями по энергопотреблению и сложностью реализации в малогабаритном исполнении, однако современные химические источники питания, а также радиоэлектронная база позволили преодолеть эти ограничения.

Сегодня на рынке средств неразрушающего контроля представлен единственный в России ЭМА толщиномер с импульсным поляризующим полем, разработанный фирмой ООО «АКС» [68]. Поляризующее поле направлено по нормали к поверхности объекта контроля, длительность подмагничивающего импульса составляет более 1 мс. ЭМА преобразователь, применяемый в этом толщиномере, может использоваться при неразрушающем контроле как магнитных, так и немагнитных материалов эхо-импульсным методом [69, 70]. Глубина скин-слоя при такой длительности импульса достаточна для беспрепятственного протекания магнитного потока в рабочей области ЭМА преобразователя. Следует отметить, что для создания в рабочей области однородного и большого по амплитуде магнитного поля, её величина должна быть мала: порядка 5 мм в диаметре. При увеличении размеров рабочей области необходимо увеличивать длительность подмагничивающего импульса. Под рабочей областью понимается область, в которой происходит ЭМА преобразование, то есть в ней создаётся поляризующее поле и располагается первичный ЭМА преобразователь. Малый размер рабочей области ЭМА преобразователей с ортогональным импульсным

поляризующим полем не позволяет применять их для волноводного метода контроля ЭМА способом длинномерных ферромагнитных объектов.

При ортогональном импульсном поляризующем поле вихревые токи мешают созданию необходимой величины магнитного поля в материале объекта контроля, а при параллельном импульсном поляризующем поле вихревые токи, напротив, помогают намагнитить поверхностный слой объекта контроля до насыщения и создать необходимую амплитуду поляризующего поля. Размеры первичных ЭМА преобразователей для возбуждения и приёма волн Лэмба, Рэлея или нормальных поперечных волн ( $SH$ ), применяемых для волноводного ЭМА метода, составляют порядка  $40 \times 40$  мм, поэтому для волноводного способа контроля с использованием импульсного подмагничивания целесообразно использовать не ортогональное, а параллельное поверхности объекта контроля поляризующее поле. Для стали нужно создать примерно  $350 \cdot 10^2$  А/м, так как при таком значении параллельного поляризующего поля достигается максимальная эффективность возбуждения ультразвуковых волн ЭМА способом, основанном на эффекте магнитострикции (рисунок 4.1).

#### **4.3. Расчётная схема геометрических и электрических параметров импульсной намагничивающей системы**

Импульсное параллельное поляризующее поле проще всего создать с помощью П-образного электромагнита, в обмотку которого подаётся импульсный ток. Речь в данной главе пойдёт об определении геометрических параметров П-образного электромагнита, длительности импульса подмагничивания, силы тока и количества витков в катушке, необходимых для достижения напряжённости поляризующего поля  $350 \cdot 10^2$  А/м в скин-слое ферромагнетика.

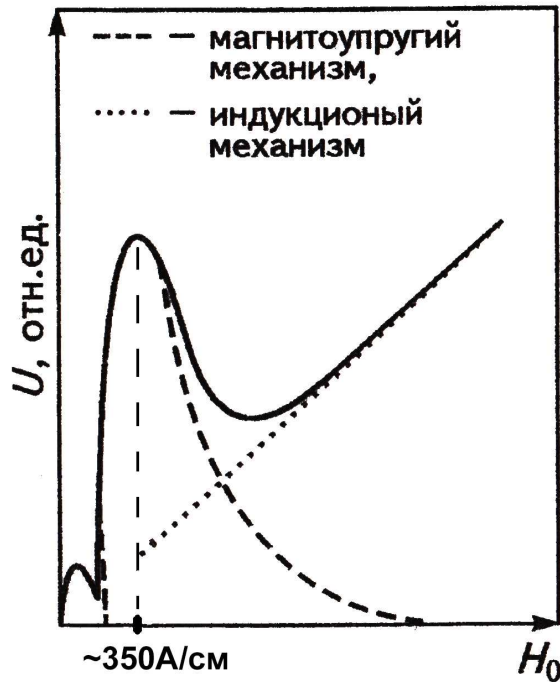


Рисунок 4.1 — Зависимость амплитуды возбуждения поверхностной ультразвуковой волны в поликристалле железа от напряжённости магнитного поля [44]

#### 4.3.1. Длительность подмагничивающего импульса, глубина скин-слоя

Считается, что при параллельном намагничивании П-образным приставным электромагнитом важную роль играет толщина ферромагнитного объекта: чем она больше, тем сложнее создать требуемое магнитное поле вследствие растекания магнитного потока вглубь ферромагнетика. При импульсном намагничивании в объекте возникают вихревые токи, «выталкивающие» магнитный поток к его поверхности, поэтому отпадает необходимость «промагничивать» ферромагнетик по всей его толщине, что является существенным преимуществом использования импульсного подмагничивания. Кроме того, можно использовать короткий импульс подмагничивания, что существенно снизит энергопотребление импульсного электромагнита, так как чем меньше длительность подмагничивающего импульса, тем меньше глубина скин-слоя и тем проще создать в нём требуемое магнитное поле. Длительность импульса подмагничивания должна быть достаточна для того, чтобы в катушке электромагнита стабильно

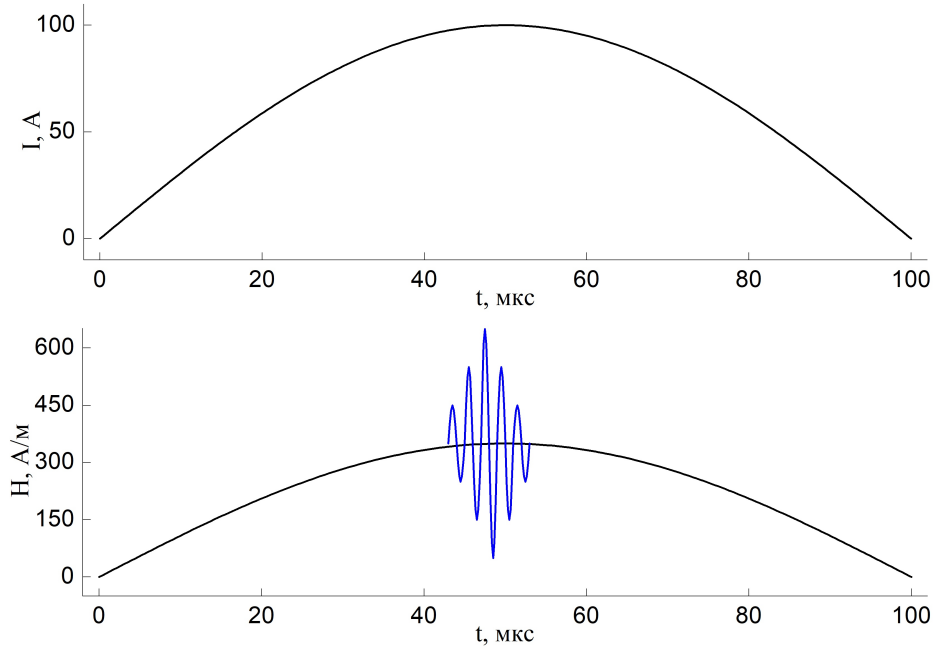


Рисунок 4.2 — Зондирующий импульс на фоне подмагничивающего импульса

лизировался заданный ток, то есть ЭМА преобразование должно происходить только вблизи максимального тока в катушке (в соответствии с рисунком 4.2).

При гармоническом перемагничивании глубина скин-слоя зависит от частоты. В первом приближении можно считать, что длительность импульса  $\tau_u$  составляет половину периода некоей эффективной частоты  $f_{эф}$ :

$$f_{эф} \approx \frac{1}{2\tau_u}. \quad (4.1)$$

При определённой эффективной частоте перемагничивания можно вычислить значения глубин скин-слоя для линейного ( $\mu = const$ ) и нелинейного случаев ( $\mu \neq const$ ), которые будут примерно соответствовать глубинам скин-слоя при импульсном намагничивании: скин-слой объекта контроля под импульсным электромагнитом должен находиться в глубоком насыщении  $\mu \neq const$ , а магнитопровод (ярмо и полюса электромагнита) должен работать в линейной зоне кривой намагничивания  $\mu = const$  (в соответствии с рисунком 4.3). Эти значения глубин скин-слоя помогут нам в дальнейших вычислениях геометрических параметров импульсного электромагнита.

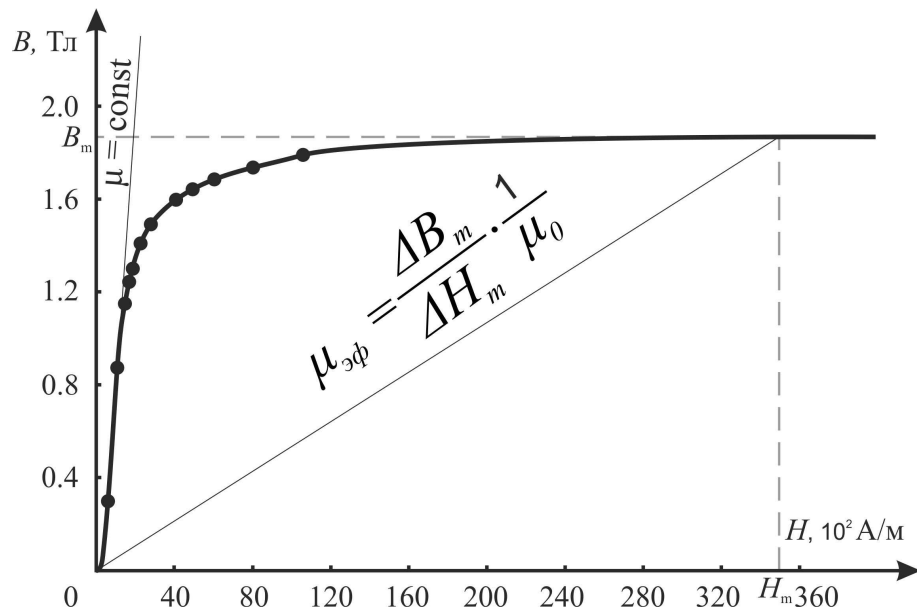


Рисунок 4.3 — Кривая намагничивания стали 20 [71]

**Линейный случай расчёта глубины скин-слоя** Для линейного случая ( $\mu = const$ ), глубина скин-слоя определяется следующей формулой:

$$\bar{\Delta} = \sqrt{\frac{2}{\omega_{эф} \cdot \sigma \cdot \mu_0 \mu}}, \quad (4.2)$$

где:

$\bar{\Delta}$  — глубина скин-слоя для линейного случая, м;

$\omega_{эф} = 2\pi f_{эф}$  — эффективная круговая частота, рад/с;

$\sigma$  — удельная электропроводность материала, См/м;

$\mu$  — магнитная проницаемость материала;

$\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ , Гн/м.

Для стали:  $\mu = 10^3$ ,  $\sigma = 10^7 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$ .

### Нелинейный случай расчёта глубины скин-слоя

Скин-слой объекта контроля под импульсным электромагнитом циклически перемагничивается от  $-B_m$  до  $+B_m$ , поэтому магнитную проницаемость ферромагнетика можно определить как эффективную магнитную проницаемость  $\mu_{эф}(H_m) = \frac{\Delta B_m}{\Delta H_m} \cdot \frac{1}{\mu_0}$  (рисунок 4.3). Такой случай можно считать пре-



дельно-нелинейным случаем и глубину скин-слоя можно вычислить по формуле Е. Розенберга [72, 73]:

$$\tilde{\Delta} = \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \omega_{эф}} \cdot \frac{H_m}{B_m}} = \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \omega_{эф}} \cdot \frac{1}{\mu_{эф}(H_m)}}, \quad (4.3)$$

где:

$\tilde{\Delta}$  – глубина скин-слоя для нелинейного случая, м;

$H_m$  – максимальная амплитуда напряжённости внешнего магнитного поля, А/м;

$B_m$  – магнитная индукция на поверхности металла при максимальной амплитуде напряжённости магнитного поля ( $B_m \approx 1,8$  Тл, в соответствии с рисунком 4.3).

#### 4.3.2. Геометрические параметры импульсной намагничивающей системы

Импульсный электромагнит для ЭМА преобразователя состоит из двух полюсов, ярма и катушки, намотанной на ярмо (рис 4.4). При импульсном перемагничивании ярмо и полюса должны быть выполнены из высокочастотного магнитомягкого материала, например, из тонколистовой электротехнической стали или феррита.

Условные обозначения геометрических параметров П-образного электромагнита приведены на рисунке 4.4. Межполюсное расстояние  $l$ , а также ширина ярма и полюсов  $b$  выбираются исходя из размеров первичных ЭМА преобразователей, помещаемых в межполюсное пространство электромагнита. Импульсный ЭМА преобразователь может использоваться не только при стационарных измерениях, но и во время сканирования, при котором между полюсами и поверхностью ферромагнетика может образоваться зазор  $h_з$ , который необходимо учесть в дальнейших расчётах. Таким образом, из геометрических параметров

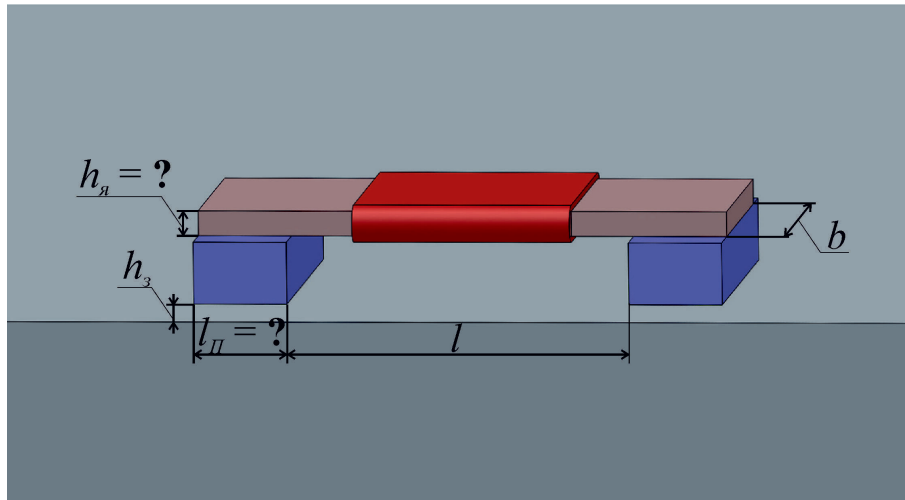


Рисунок 4.4 — Внешний вид и условные обозначения размеров П-образного импульсного электромагнита

необходимо определить поперечное сечение яра  $S_{я} = h_{я} \cdot b$ , поперечное сечение полюсов  $S_{п} = l_{п} \cdot b$ , а также требуемую толщину электротехнической стали.

Упрощенная расчётная схема магнитной цепи показана на рисунке 4.5.

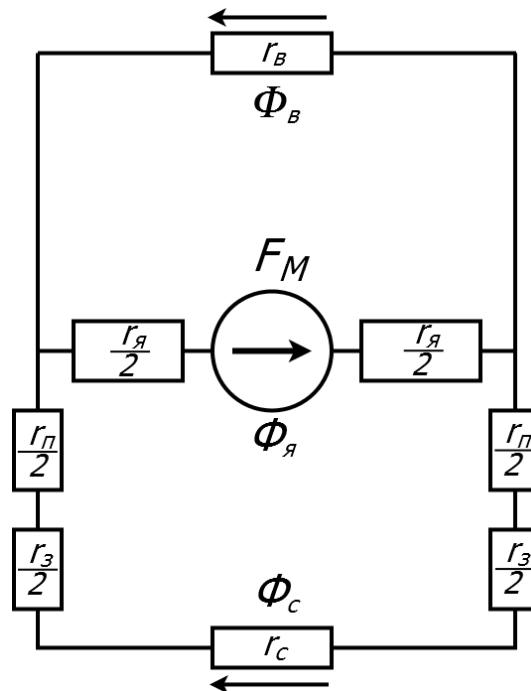


Рисунок 4.5 — Схема для расчёта магнитной цепи

На этой схеме  $F_M$  — общая магнитодвижущая сила (МДС), определяемая количеством ампер-витков в катушке импульсного электромагнита;  $r_c$  — магнитное сопротивление скин-слоя намагничиваемого отрезка ферромагнетика;

$r_z$  – общее сопротивление двух воздушных зазоров между полюсами электромагнита и поверхностью ферромагнетика;  $r_{II}$  – общее магнитное сопротивление двух полюсов;  $r_\epsilon$  – магнитное сопротивление потока, протекающего по воздуху и шунтирующего намагничиваемый участок ферромагнетика;  $r_\alpha$  – сопротивление ярма;  $\Phi_\alpha, \Phi_\epsilon, \Phi_c$  – магнитный поток в ярме, воздухе и скин-слое, соответственно.

Уравнения магнитостатики для рассматриваемой магнитной цепи имеют следующий вид:

$$\Phi_\alpha = \Phi_\epsilon + \Phi_c, \quad (4.4)$$

$$F_M = U_\alpha + U_{II} + U_z + U_c, \quad (4.5)$$

где:  $U_\alpha, U_{II}, U_z, U_c$  – падение магнитного потенциала в ампер-витках, на ярме, полюсах, зазоре и скин-слое, соответственно.

Весь магнитный поток, создаваемый катушкой ярма, условно делится на два потока: полезный поток в рабочей области между полюсами электромагнита (в скин-слое объекта контроля) и поток рассеяния, замыкающийся по воздуху в соответствии с рисунком 4.6.

Предположим, что магнитное сопротивление скин-слоя ферромагнетика  $r_c$  в  $n$  раз больше магнитного сопротивления воздуха  $r_\epsilon$ , т.е. магнитный поток в скин-слое ферромагнетика  $\Phi_c$  в  $n$  раз меньше магнитного потока в воздухе  $\Phi_\epsilon$ . Магнитное сопротивление воздуха можно считать постоянным, а сопротивление скин-слоя для нелинейного случая будет зависеть от длительности импульса (согласно выражению (4.3)). Численное моделирование в программной системе конечно-элементного анализа FEMM показало, что магнитное сопротивление воздуха в П-образной системе (рисунок 4.6) примерно равно магнитному сопротивлению скин-слоя глубиной 1400 мкм.

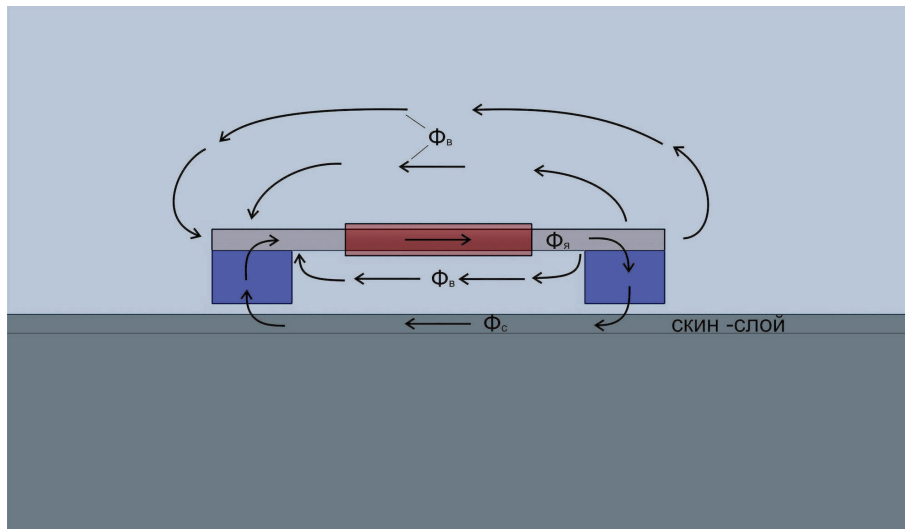


Рисунок 4.6 — Растекание магнитного потока в электромагните, воздухе и металле

Тогда:

$$n = \frac{r_c}{r_e} = \frac{\Phi_e}{\Phi_c} = \frac{1,4 \cdot 10^{-3} \mathcal{M}}{\tilde{\Delta}}. \quad (4.6)$$

Найдём магнитный поток в ярме электромагнита:

$$\Phi_{я} = \Phi_e + \Phi_c = (n + 1) \cdot \Phi_c. \quad (4.7)$$

Так как ширина ярма равна ширине рабочей области, то при равной магнитной индукции в ярме и в рабочей области ( $B_m = 1,8$  Тл), толщина ярма должна быть в  $(n + 1)$  раз больше скин-слоя. При индукции 1,8 Тл материал ярма (электротехническая сталь) будет находиться в насыщении и работать будет неэффективно, поэтому необходимо увеличить толщину ярма ещё в 2 раза. Тогда индукция в ярме будет равна  $B = 0,9$  Тл и материал ярма будет работать в линейной области:

$$\Phi_{я} = \frac{1}{2} \cdot B_m \cdot h_{я} b = (n + 1) \cdot \Phi_c = 5 \cdot B_m \cdot \tilde{\Delta} b. \quad (4.8)$$

Отсюда находим:

$$h_{\text{я}} = 2(n + 1) \cdot \tilde{\Delta} = 2(n + 1) \cdot \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \omega_{\text{эф}}} \cdot \frac{H_m}{B_m}}. \quad (4.9)$$

### 4.3.3. Сила тока и количество витков в катушке импульсного электромагнита

Ярмо и полюса импульсного П-образного магнита должны «работать» в линейной области кривой намагничивания ( $\mu \approx 1000$ , рисунок 4.3), поэтому, при достаточном поперечном сечении полюсов, падение магнитного потенциала на них незначительно и им в выражении (4.5) можно пренебречь. Тогда можно считать, что *МДС* катушки создаёт разность магнитных потенциалов только в скин-слое ферромагнетика между полюсами П-образного магнита, а также на зазоре между полюсами и поверхностью ферромагнетика:

$$F_M \approx U_z + U_c. \quad (4.10)$$

Между ферромагнетиком и полюсами электромагнита может образоваться зазор, который не должен значительно изменять значение поля в рабочей области. Зададим максимально возможное изменение поля в рабочей области, равное 10 %, и учтём это значение в итоговой *МДС*. Тогда получаем, что падение магнитного потенциала на зазорах не должно превышать 10 % от значения падения магнитного потенциала в межполюсном пространстве электромагнита  $U_c$ :

$$F_M \approx 1,1 \cdot U_c = 1,1 \cdot H_m \cdot l. \quad (4.11)$$

### 4.3.4. Поперечное сечение полюсов импульсного электромагнита

Падение магнитного потенциала на зазорах не должно превышать 10 % от падения магнитного потенциала в межполюсном пространстве электромаг-

нита. Для этого необходимо выбрать достаточное поперечное сечение полюсов электромагнита, так как чем шире полюса, тем меньше влияние зазора на создаваемое в скин-слое магнитное поле.

Магнитный поток под полюсами электромагнита (в воздушном зазоре между полюсами электромагнита и поверхностью ферромагнетика) равен магнитному потоку, протекающему по скин-слою объекта контроля:

$$\Phi_{II} = B_{II}S_{II} = B_s S_c, \quad (4.12)$$

где:  $\Phi_{II}$  – магнитный поток в полюсе, Вб;

$B_{II}$  – индукция магнитного поля в полюсе, Тл;

$S_c$  – площадь поперечного сечения скин-слоя, м<sup>2</sup>.

Тогда:

$$S_{II} = \frac{B_m S_c}{B_{II}}, \quad (4.13)$$

С учётом того, что падение магнитного потенциала на зазорах не должно быть больше 10 % от падения магнитного потенциала в межполюсном пространстве электромагнита, то:

$$B_{II} = \mu_0 \cdot H_z = \mu_0 \cdot \frac{U_z}{h_z} = \mu_0 \cdot \frac{0,1 \cdot U_c}{h_z}. \quad (4.14)$$

Тогда

$$S_{II} = \frac{B_m S_c \cdot h_z}{\mu_0 \cdot 0,1 \cdot H_m \cdot l}. \quad (4.15)$$

Принятые выше допущения подтверждены и скорректированы при экспериментальной проверке.

#### 4.4. Определение геометрически и электрических параметров импульсного П-образного электромагнита на примере намагничивающей системы для ЭМА преобразователя для волноводного контроля длинномерных ферромагнитных объектов

Предложенную схему расчёта импульсного подмагничивания можно использовать в любых ситуациях, когда необходимо создать большое магнитное поле в скин-слое материала объекта контроля. С помощью выражений, приведённых выше, можно с лёгкостью рассчитать параметры П-образного импульсного магнита в зависимости от длительности подмагничивающего импульса, зазора между полюсами электромагнита и поверхностью ферромагнитного материала и требуемой величины поляризующего поля.

Применительно к ЭМА способу контроля, импульсный П-образный электромагнит может играть роль намагничивающей системы ЭМА преобразователя для волноводного способа контроля или ЭМА преобразователя для толщиномеров. Проведём расчёт параметров П-образного магнита на примере намагничивающей системы для ЭМА преобразователя для волноводного контроля длинномерных ферромагнитных объектов.

Для определения длительности импульса подмагничивания ЭМА преобразователя для волноводного способа контроля необходимо учесть длину цуга зондирующих импульсов для возбуждения и приёма ультразвуковых волн Лэмба и Рэлея (применяемых для волноводного контроля в большинстве случаев), которая составляет  $10 \div 20$  мкс ( $500$  кГц,  $5 \div 10$  периодов, см. рисунок 4.2). Тогда для создания поляризующего поля достаточно длительности импульса  $\tau_u \approx 100$  мкс. Эффективная частота при заданной длительности импульса будет равна (согласно выражению (4.1))  $f_{эф} = 5$  кГц. При такой частоте толщина высокочастотной электротехнической стали не должна превышать  $140$  мкм.

Между полюсами П-образного электромагнита должен располагаться первичный ЭМА преобразователь размерами  $40 \times 40$  мм; примем ширину ярма и длину полюсов  $b = 40$  мм, межполюсное расстояние  $L$  возьмём с запасом: 70 мм. Ограничим величину возможного зазора между полюсами и поверхностью ферромагнетика  $h_z$  до 1,5 мм.

После подстановки выбранных численных значений в выражения (4.9), (4.11), (4.15) находим необходимые параметры электромагнита:  $h_y > 3,6$  мм;  $\lambda_M \approx 3000$  ампер-витков;  $S_{II} > 400$  мм<sup>2</sup>.

Таким образом, для того, чтобы создать в ферромагнитном объекте контроля магнитное поле с напряжённостью  $350 \cdot 10^2$  А/м подмагничивающим импульсом с длительностью 100 мкс, необходимо использовать в качестве материала ярма электротехническую сталь толщиной менее 140 мкм, толщина ярма должна быть более 3,6 мм, катушка импульсного электромагнита должна создавать *МДС* порядка 3000 ампер-витков. С учётом зазора между полюсами импульсного электромагнита и поверхностью объекта контроля, который может достигать 1,5 мм, ширина полюсов электромагнита должна превышать 10 мм.

#### **4.5. Экспериментальная проверка эффективности разработанной импульсной намагничивающей системы**

Для проверки эффективности возбуждения волн при импульсном подмагничивании использовался П-образный электромагнит, соответствующий вычисленным параметрам. Внешний вид электромагнита приведён на рисунке 4.7.

Ярмо электромагнита выполнено из трансформаторной стали толщиной 60 мкм, полюса из феррита. На ярмо электромагнита намотано 30 витков медного провода с сечением 1 мм. Масса электромагнита составила порядка 100 г. Согласно расчётам, в электромагните необходимо создать *МДС* 3000 ампер-витков. При 30 витках в обмотке необходимо создать ток 100 А.



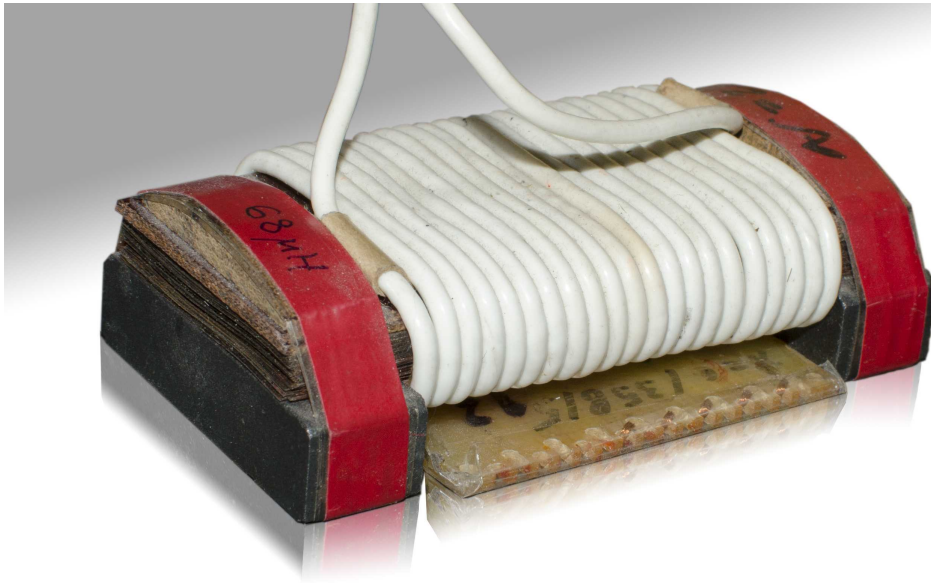


Рисунок 4.7 — Внешний вид импульсного П-образного электромагнита

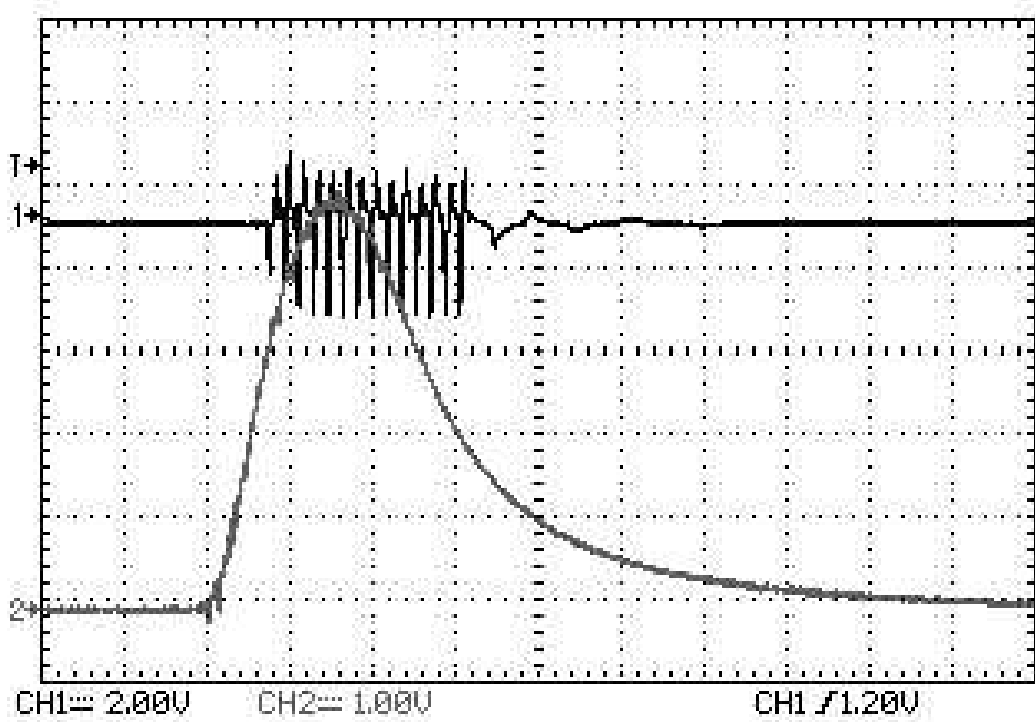


Рисунок 4.8 — Осциллограмма зондирующего импульса на фоне подмагничивающего импульса, создаваемого импульсным электромагнитом

Для создания импульсного тока длительностью 50-200 мкс и амплитудой 100 А был разработан лабораторный генератор импульсного тока, схема которого приведена в приложении Е.

Эксперименты показали, что при увеличении тока в импульсе от 50 до 100 А эффективность ЭМА преобразования при возбуждении УЗ волны катушкой, расположенной в межполюсном пространстве электромагнита, сначала увеличивается, а при токе выше 80 А начинает медленно убывать. Это свидетельствует о том, что при токе 80 А в рабочей области импульсного электромагнита, создаётся поле около  $350 \cdot 10^2$  А/м (в соответствии с рисунком 4.1). Эффективность ЭМА преобразования при импульсном подмагничивании совпадает с эффективностью ЭМА преобразования при статическом параллельном подмагничивании при равных амплитудах полей.

Реальный импульс, снятый с генератора, а также зондирующий импульс показаны на рисунке 4.8

#### 4.6. Выводы к главе 4

1. Приведён аналитический расчёт и оптимизация П-образной импульсной намагничивающей системы для ЭМА преобразователя, позволяющей создавать параллельное поверхности объекта контроля поляризующее поле с напряжённостью до  $H = 350 \cdot 10^2$  А/м в скин-слое массивного ферромагнитного материала с учётом его нелинейных свойств.
2. Разработана малогабаритная импульсная П-образная намагничивающая система для ЭМА преобразователя с параллельным к поверхности ферромагнетика поляризующим полем, позволяющая при малых массогабаритных характеристиках и энергопотреблении полностью избавиться от сил магнитного притяжения преобразователя к ферромагнитным объектам контроля и добиться сопоставимой чувствительности и соотношения сигнал/шум, что и при использовании оптимизированной намагничивающей

системы с неколлинеарной конфигурацией постоянных магнитов.

3. Показано, что такой электромагнит можно использовать при сканировании ЭМА способом, так как зазор между полюсами электромагнита и поверхностью ферромагнетика может достигать 1,5 мм.
4. Разработанная импульсная намагничивающая система может быть использована как для ЭМА толщинометрии, так и для волноводного ультразвукового контроля ЭМА способом с помощью волн Лэмба, Рэлея или нормальных поперечных волн ( $SH$ ).

## 5. БЕСКОНТАКТНОЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН БЕЗ ПОЛЯРИЗУЮЩЕГО ПОЛЯ

### 5.1. Особенности механизма ЭМА преобразования, основанного на эффекте магнитострикции

Относительно низкая эффективность ЭМА преобразования (по сравнению с пьезопреобразователями) и большие массогабаритные характеристики намагничивающих систем для создания поляризующих полей являются основными недостатками этого метода [74]. Увеличение эффективности ЭМА преобразования возможно за счёт увеличения амплитуды постоянного магнитного поля [12], а также за счёт повышения мощности генераторов, питающих ЭМА преобразователи [5].

ЭМА возбуждение ультразвуковых колебаний за счёт магнитострикционного эффекта возможно и без поляризующего поля, при этом частота возбужденных в ферромагнитном объекте контроля ультразвуковых колебаний равна удвоенной частоте возбуждающего поля (по отношению к частоте тока в излучающей катушке ЭМА преобразователя), так как магнитострикционный эффект – чётный, то есть не зависит от направления вектора магнитного поля. Тем не менее, такая возможность не используется при разработке ЭМА преобразователей для неразрушающего контроля ферромагнитных материалов.

В экспериментальных работах [75–80], посвящённых возбуждению ультразвука на удвоенной частоте, используется относительно небольшая амплитуда возбуждающего поля. В статье [75] показано, что при малой амплитуде возбуждающего поля эффективность возбуждения ультразвука на удвоенной частоте без поляризующего поля в десятки раз меньше эффективности возбуждения на основной частоте с оптимальным поляризующим полем.

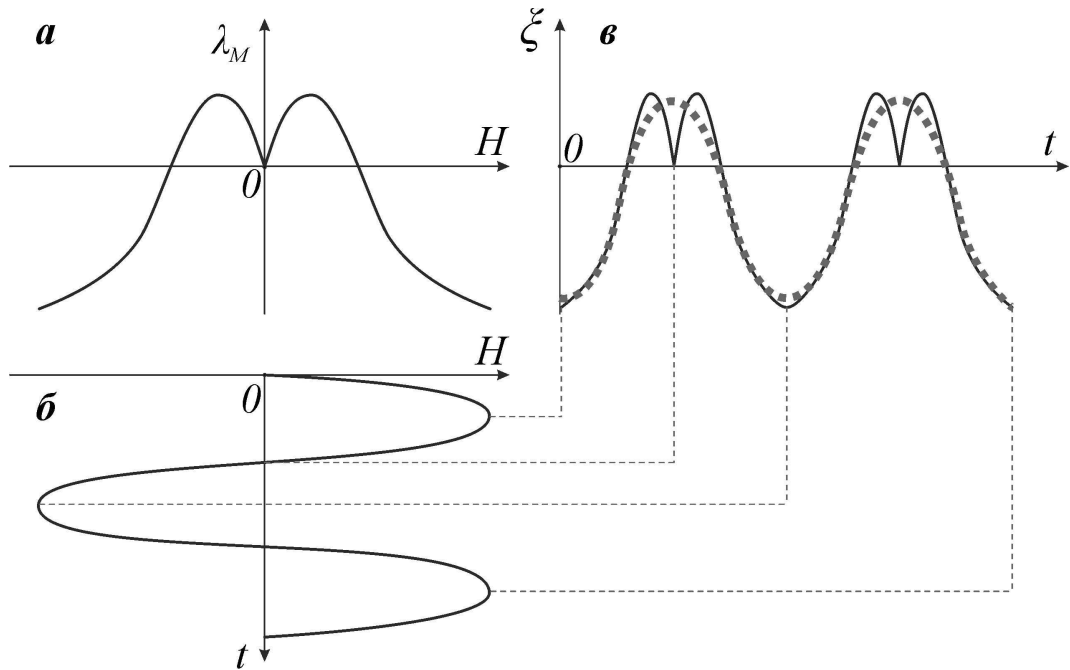


Рисунок 5.1 — Иллюстрация чётности магнитострикционного эффекта:

- а – зависимость коэффициента магнитострикции  $\lambda_M = f(H)$  от магнитного поля  $H$ ;  
 б – изменение напряжённости магнитного поля  $H = f(t)$ ; в – деформация образца  $\xi$

В настоящей работе исследуется эффективность ЭМА возбуждения ультразвука на удвоенной частоте по сравнению с частотой поля излучающей катушки ЭМА преобразователя при повышении амплитуды переменного возбуждающего магнитного поля этой катушки. Предполагается, что при достаточно больших амплитудах возбуждающего поля эффективность возбуждения без поляризующего поля будет сравнима с эффективностью возбуждения при использовании поляризующего поля.

Чётность магнитострикционного эффекта, а также деформацию образца при циклическом перемагничивании, то есть при возбуждении ультразвуковых колебаний на удвоенной частоте в железе, демонстрирует рисунок 5.1. Переменное магнитное поле возбуждающей катушки изменяется по гармоническому закону (рисунок 5.1б):

$$H = H_m \sin(\omega t), \quad (5.1)$$

где:  $H_m$  – максимальная амплитуда напряжённости магнитного поля излучающей катушки, А/м;

$\omega$  – круговая частота, рад/с;

$t$  – время, с.

В результате воздействия переменного магнитного поля на ферромагнетик частота деформации  $\xi$  ферромагнетика удваивается (рисунок 5.1в) и изменяется по закону:

$$\xi = \xi_m \sin(2\omega t), \quad (5.2)$$

где:  $\xi_m$  – максимальное значение деформации образца.

Особенностью магнитострикции в железе и сталях на его основе является её немонотонная зависимость от приложенного поля. В слабых полях магнитострикция растёт, а затем уменьшается до магнитострикции насыщения (рисунок 5.1а). По этой причине эффективность возбуждения ультразвука на удвоенной частоте будет сначала возрастет с увеличением амплитуды возбуждающего поля, затем уменьшится до нуля, а затем снова начнёт увеличиваться.

Эффективность генерации ультразвука за счёт магнитострикции определяется глубиной скин-слоя на заданной частоте и величиной изменения магнитострикции при заданной амплитуде возбуждающего поля:

$$P(H_m) \sim \lambda_M(H_m) \cdot \bar{\Delta}(H_m), \quad (5.3)$$

где:  $\lambda_M(H_m)$  – коэффициент магнитострикции при максимальном значении амплитуды возбуждающего магнитного поля;

$\bar{\Delta}(H_m)$  – глубина скин-слоя, м.

При генерации ультразвука на удвоенной частоте ЭМА методом материал ферромагнетика циклически перемагничивается от  $-B_m$  до  $+B_m$ , поэтому маг-

нитную проницаемость ферромагнетика можно определить как эффективную магнитную проницаемость  $\mu_{эф}(H_m) = \frac{\Delta B_m}{\Delta H_m} \cdot \frac{1}{\mu_0}$  (рисунок 4.3). Если поляризующее поле отсутствует, глубина скин-слоя будет увеличиваться с увеличением амплитуды возбуждающего переменного магнитного поля. Глубину скин-слоя можно определить по формуле (4.3).

При генерации ультразвука эффективная магнитная проницаемость будет уменьшаться при повышении амплитуды возбуждающего переменного магнитного поля (рисунок 4.3), поэтому по мере роста амплитуды глубина скин-слоя будет возрастать.

## 5.2. Экспериментальные исследования возбуждения ультразвуковых волн на удвоенной частоте

Экспериментальная проверка высказанных предположений проводилась на пластине из Стали 20 толщиной 16 мм. Блок схемы ЭМА установок по возбуждению и регистрации ультразвука на удвоенной частоте без поляризующего поля и на основной частоте с поляризующим полем представлены на рисунке 5.2. В качестве первичных преобразователей для возбуждения и приёма ультразвуковых волн использовались проволочные меандровые катушки. Для ЭМА возбуждения использовался генератор импульсов с радиочастотным заполнением в 3-5 периодов частотой 250 кГц или 500 кГц в зависимости от возбуждаемой моды ультразвуковой волны. Количество витков излучающих катушек и ток подбирались таким образом, чтобы при возбуждении различных типов волн *МДС* излучающих катушек была одинакова и составляла  $\sim 300$  ампер-витков. В экспериментах изменялась величина зазора между излучающей катушкой и поверхностью ферромагнетика, так как от неё зависит переменное магнитное поле, создаваемое в материале ферромагнетика, поэтому по результатам экспериментов можно судить об эффективности двойного ЭМА преобразования в зависимости от переменного возбуждающего магнитного поля.

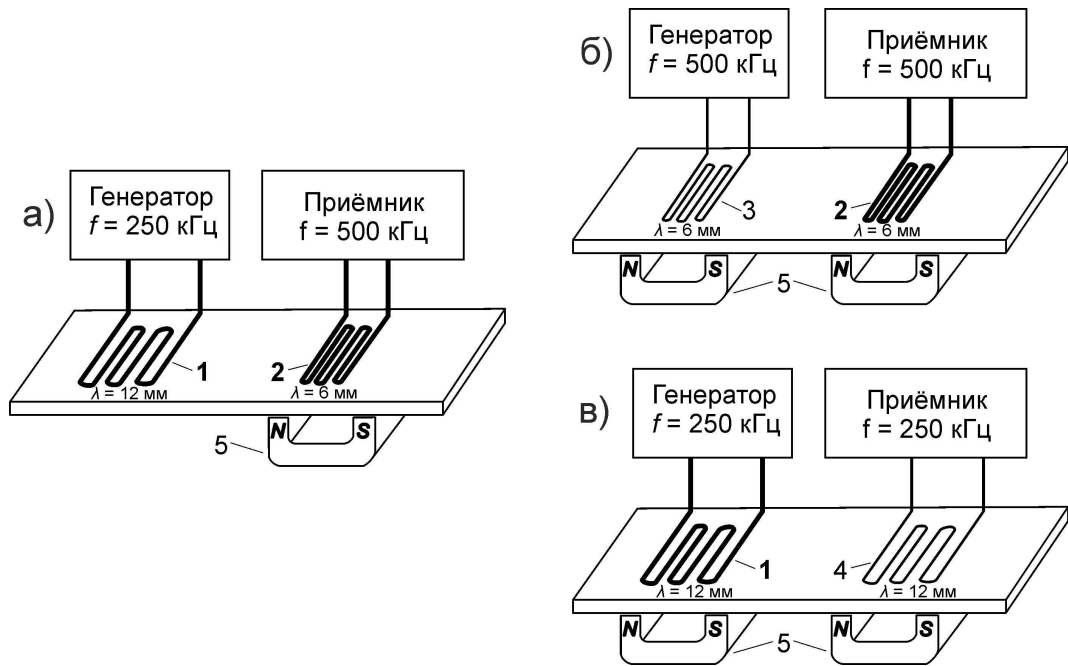


Рисунок 5.2 — Блок схемы установок для возбуждения и приёма ультразвуковых волн:

- а – Рэлея на удвоенной частоте (частота излучателя 250 кГц, приёмника 500 кГц);
- б – Рэлея на основной частоте (500 кГц); в – Лэмба на основной частоте (250 кГц);
- 1, 3 – излучающие катушки; 2, 4 – приёмные катушки; 5 – подмагничивающая система

При генерации на удвоенной частоте возбуждающая катушка должна иметь период меандра в два раза больше, чем приёмная катушка (рисунок 5.2а) для того, чтобы частоты и длины волн возбуждаемых в ферромагнетике акустических колебаний оставались постоянными при разных схемах возбуждения (рисунок 5.2а и 5.2б). Возбуждалась и регистрировалась волна Релея с длиной волны 6 мм. При возбуждении на частоте 250 кГц использовалась катушка с периодом  $\lambda = 12$  мм, а приём осуществлялся на частоте 500 кГц катушкой с периодом  $\lambda = 6$  мм. Сигнал принимался при намагничивании стальной пластины лабораторным электромагнитом до оптимальной амплитуды поляризующего поля – 300 А/см. Следует акцентировать внимание на том, что излучение на удвоенной частоте проводилось без применения намагничивающей системы.

Для сравнения эффективности возбуждения на удвоенной частоте без использования поляризующего поля и на основной частоте с использованием поля-



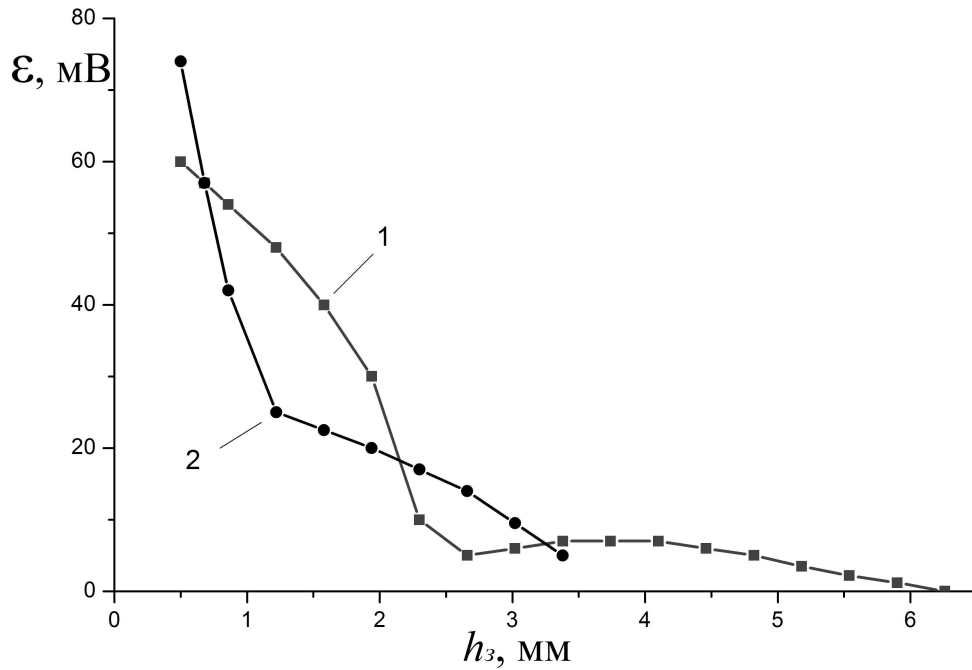


Рисунок 5.3 — Зависимость амплитуды принятого сигнала при ЭМА возбуждении волны Рэлея от зазора между излучающим ЭМА преобразователем и поверхностью ферромагнетика: 1 – возбуждение на удвоенной частоте; 2 – возбуждение на основной частоте с поляризующим полем 300 А/см

ризирующего поля были проведены эксперименты, результаты которых представлены на рисунках 5.3 и 5.5. На этих рисунках показаны зависимости амплитуд принятых сигналов при двойном ЭМА преобразовании (излучение-приём) от величины зазора между катушкой возбуждения и поверхностью стальной пластины. На рисунке 5.3 показаны зависимости амплитуд принятых сигналов при ЭМА возбуждении волны Рэлея с длиной волны 6 мм разными способами. Первый способ – катушкой  $\lambda = 12$  мм на удвоенной частоте без поляризующего поля (рисунок 5.2а); второй способ – катушкой  $\lambda = 6$  мм на основной частоте с оптимальным поляризующим полем  $H = 300$  А/см (рисунок 5.2б).

Из рисунка видно, что при больших амплитудах переменного магнитного поля (что соответствует малым зазорам на рисунке 5.3), эффективность возбуждения на основной частоте с поляризующим полем и на удвоенной частоте без поляризующего поля примерно равны. При увеличении зазора до 1-2 мм амплитуда принятого сигнала на удвоенной частоте даже больше, чем на основ-

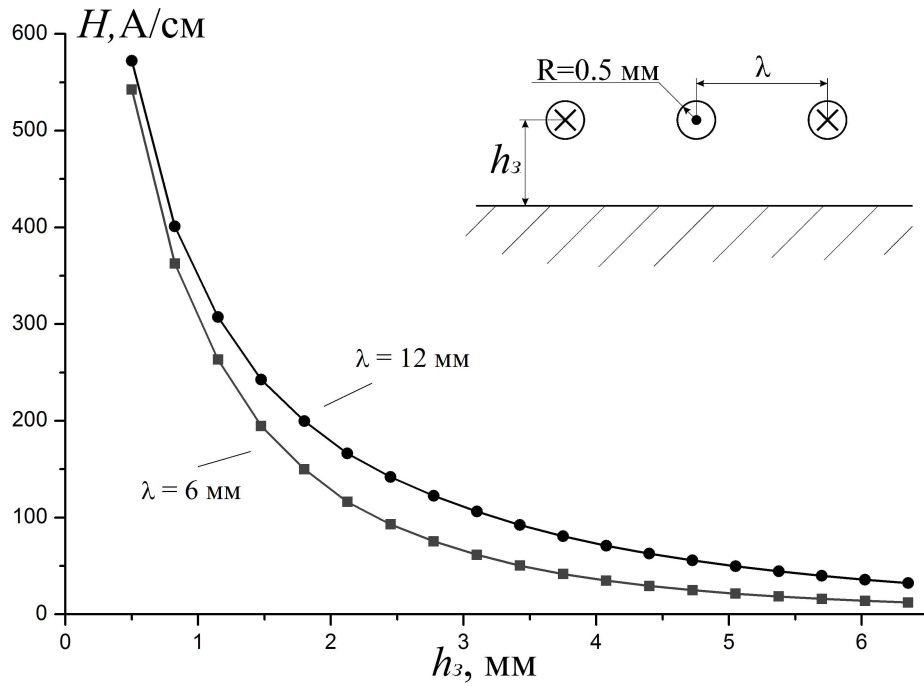


Рисунок 5.4 — Напряжённость магнитного поля на поверхности металла, создаваемое системой проводников, образующих меандр при токе в проводниках  $I = 300$  А

ной частоте. Этот факт объясняется разным периодом катушек возбуждения: при большем периоде катушки расстояние между проводниками больше и взаимное влияние двух соседних проводников меньше. Рисунок 5.4 демонстрирует рассчитанные в программном комплексе Femm 4.2 зависимости напряжённости магнитного поля на поверхности ферромагнетика от величины зазора для двух различных периодов меандровых излучающих катушек:  $\lambda = 6$  мм и  $\lambda = 12$  мм.

На рисунке 5.5 показаны зависимости амплитуд принятых сигналов при ЭМА возбуждении разных типов волн одинаковыми излучающими катушками (схема установки показана на рисунке 5.2в). Так как принимались разные типы волн и разными катушками, то на рисунке приведены относительные амплитуды принятых сигналов при генерации ультразвука на удвоенной и на основной частотах.

Поскольку в обоих случаях возбуждение происходило одной и той же катушкой, то этот график демонстрирует, как влияет амплитуда возбуждающего поля на эффективность возбуждения на удвоенной частоте без поляризующего поля (с увеличением зазора амплитуда возбуждающего поля уменьшается).

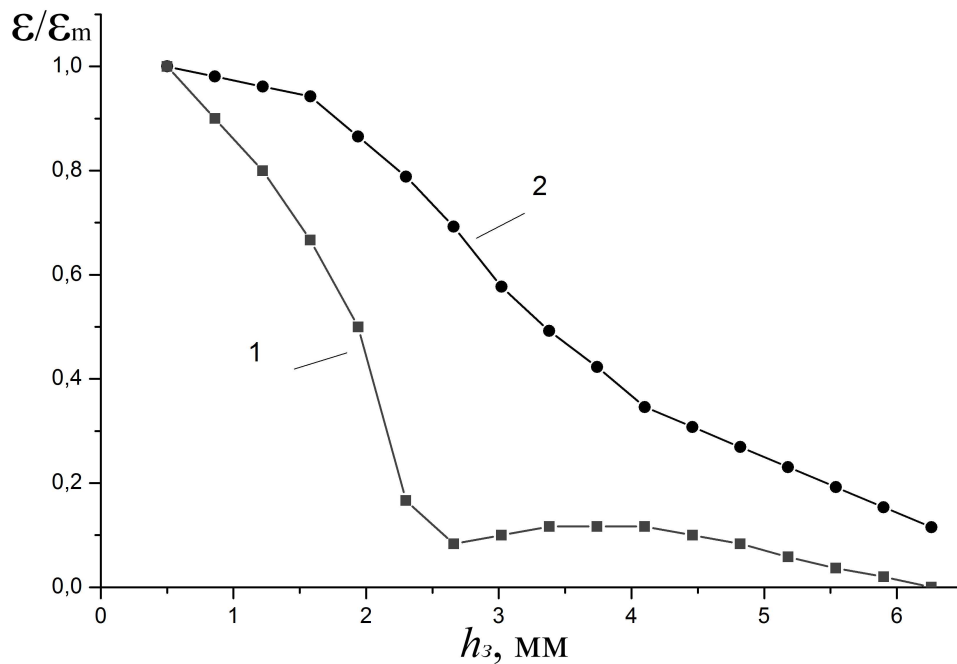


Рисунок 5.5 — Зависимость амплитуды принятого сигнала при возбуждении волны Рэлея (ЭМА преобразование на удвоенной частоте, кривая 1) и волны Лэмба  $SV_0$  (ЭМА преобразование на основной частоте, кривая 2) от зазора между ЭМА преобразователем и поверхностью ферромагнетика

Как и предполагалось, при малой амплитуде поля излучающей катушки (величина зазора 5–6 мм на рисунке 5.5) эффективность ЭМА преобразования без поляризующего поля значительно меньше, чем с поляризующим полем. При увеличении амплитуды (уменьшении величины зазора) возбуждающего поля эффективность возбуждения начинает расти, затем снижается, а потом резко увеличивается и становится сравнима с эффективностью возбуждения на основной частоте с использованием поляризующего поля.

### 5.3. Заключение к главе 5

1. Предложен высокоэффективный бесконтактный магнестрикционный способ генерации ультразвуковых волн без использования поляризующего поля. Способ основан на удвоении частоты излучённой ультразвуковой волны по сравнению с частотой поля возбуждающей катушки за счёт чётности магнестрикционного эффекта.

2. Представлено сравнение эффективности возбуждения и приёма ультразвуковых волн на удвоенной частоте без поляризующего поля и на основной частоте с использованием поляризующего поля.
3. Эффективность возбуждения при увеличении амплитуды возбуждающего поля объясняется одновременным увеличением коэффициента магнито-стрикции и уменьшением эффективной магнитной проницаемости.
4. Преобразователь, возбуждающий ультразвуковые волны на удвоенной частоте, обладает малыми массогабаритными размерами, не притягивается к поверхности ферромагнетика и не уступает по эффективности ЭМА преобразователям на основной частоте. Такой преобразователь может быть использован в составе автоматизированных сканеров-дефектоскопов, а также ручного диагностического оборудования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что повышение чувствительности ЭМА преобразователей при контроле ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки возможно за счёт использования волны Рэлея и квазирэлеевских волн, так как они обладают малой дисперсией и затуханием. Для исключения неоднозначности результатов при волноводном контроле ЭМА методом разработана многоканальная схема включения вложенных друг в друга со сдвигом фазы первичных ЭМА преобразователей, позволяющая излучать и принимать ультразвуковой сигнал только с одной стороны (однонаправленные первичные ЭМА преобразователи). Последующее повышение чувствительности достигается за счёт оптимизации величины и пространственной конфигурации поляризующего поля ЭМА преобразователя.

2. На основании численного моделирования и экспериментальных исследований разработана конструкция намагничивающего устройства с неколлинеарной конфигурацией постоянных магнитов, позволяющая получить ортогональное к поверхности ферромагнетика однородное магнитное поле во всей рабочей области ЭМА преобразователя и обеспечивающая создание в поверхностном слое ферромагнетика вне зависимости от его толщины магнитной индукции до 2 Тл при массе намагничивающей системы не более 3 килограммов. Предложенная конструкция обеспечивает почти десятикратное увеличение отношения сигнал/шум при генерации и приёме ультразвуковых волн ЭМА методом по сравнению с типовыми намагничивающими системами.

3. Разработана компактная импульсная П-образная намагничивающая система для ЭМА преобразователя с тангенциальным поляризующим полем, позволяющая полностью избавиться от сил магнитного притяжения преобразователя к ферромагнитным объектам контроля и обеспечивающая такую же чувствительность и соотношение сигнал/шум при двойном ЭМА преобразовании, что и намагничивающая система с неколлинеарной конфигурацией

постоянных магнитов.

4. Экспериментально показано, что при амплитуде намагничивающего поля более 300 А/см, эффективность не требующего поляризующего поля магнитострикционного возбуждения ультразвуковых волн на удвоенной частоте не уступает эффективности возбуждения на основной частоте при наличии магнитной поляризации.

5. Разработана линейка новых ЭМА преобразователей и устройств для бесконтактной сканирующей ультразвуковой диагностики длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки, отличающихся увеличенной чувствительностью к дефектам сплошности и улучшенными массогабаритными характеристиками:

– ЭМА преобразователь с постоянным ортогональным к поверхности объекта контроля поляризующим полем, создаваемым системой с неколлинеарной конфигурацией постоянных магнитов;

– ЭМА преобразователь с импульсным поляризующим полем, направленным параллельно поверхности объекта контроля;

– магнитострикционный излучатель ультразвуковых колебаний.

Разработанный на основе полученных результатов оптимизированный ЭМА преобразователь с постоянным ортогональным к поверхности объекта контроля поляризующим полем был использован АО «НПО «Интротест» при разработке сканера-дефектоскопа ЭМА-МГТУ-2.

*Автор работы благодарит научного руководителя д.т.н. Я.Г. Смородинского за постоянную помощь в работе, полезные советы и поддержку на протяжении всех этапов исследования. Автор выражает благодарность Ю.Л. Гобову, совместно с которым были получены приведённые в диссертации экспериментальные и теоретические данные, а также В.Н. Костину за советы в оформлении текста диссертации.*

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

ЭМА – электромагнитно-акустический

УЗК – ультразвуковой контроль

УЗ – ультразвуковой

МДС – магнитодвижущая сила

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений [Текст] / Н.П. Алешин. — М. : Машиностроение, 2006. — С. 368с.
2. Катен-Ярцев, А.С. Современные методы и средства рельсовой дефектоскопии [Текст] / А.С. Катен-Ярцев, В.В. Григорьев. — Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2010. — С. 178.
3. Сучков, Г.М. Повышение чувствительности ЭМА приборов [Текст] / Г.М. Сучков // Дефектоскопия. — 1990. — № 2. — С. 15–22.
4. Сучков, Г.М. Реальная чувствительность ЭМА-приборов [Текст] / Г.М. Сучков, А.В. Данченко // Дефектоскопия. — 2007. — № 6. — С. 43–50.
5. Генератор зондирующих импульсов для ЭМА-дефектоскопов [Текст] / Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, И.В. Чередниченко [и др.] // Дефектоскопия. — 2012. — № 9. — С. 42–47.
6. Алехин, С.Г. Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле: автореф. дисс. . . . канд. технических наук: 05.11.13 / Алехин Сергей Геннадиевич – Москва: ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР», 2013. – 95с.
7. Диагностика производственных объектов и систем газораспределения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.npcmolniya.ru/provodimieraboti/diagnostika/> (дата обращения: 19-06-2017).
8. Автоматизированный сканер-дефектоскоп «Автокон-ЭМА-МГТУ» [Текст] / Н.П. Алешин, М.М. Сыркин, М.В. Григорьев, Д.М. Козлов // Сварка и диагностика. — 2009. — № 4. — С. 28–31.



9. Ильясов, Р.С. О механизме ЭМА преобразования волн Рэлея в ферромагнетиках при различных частотах [Текст] / Р.С. Ильясов, С.Э. Бабкин, В.А. Комаров // Дефектоскопия. — 1988. — № 10. — С. 77–82.
10. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — 9-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Л.А. Бессонов. — М. : Высшая школа, 1996. — С. 638.
11. Автоматизированный ультразвуковой контроль труб большого диаметра [Текст] / Н.П. Алешин, Ю.Л. Гобов, А.В. Михайлов [и др.] // Дефектоскопия. — 2014. — № 3. — С. 3–11.
12. Гобов, Ю.Л. Намагничивающая система для ЭМА-сканера-дефектоскопа [Текст] / Ю.Л. Гобов, А.В. Михайлов, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. — 2014. — № 11. — С. 48–56.
13. Электромагнитно-акустический преобразователь с импульсным подмагничиванием [Текст] / А.В. Михайлов, Ю.Л. Гобов, Я.Г. Смородинский, С.В. Щербинин // Дефектоскопия. — 2015. — № 8. — С. 14–23.
14. Гобов, Ю.Л. Магнитострикционное электромагнитно-акустическое возбуждение ультразвуковых волн без поля смещения [Текст] / Ю.Л. Гобов, А.В. Михайлов, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. — 2016. — № 12. — С. 32–37.
15. Пат. 142323 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/265, F 17 D 5/00. Сканирующий дефектоскоп [Текст] / Ю.Л. Гобов, А.В. Михайлов, Я.Г. Смородинский; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт физики металлов Уральского отделения РАН – № 2014106000/28; заявл. 18.02.2014; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. — 2с.

16. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник [Текст] / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев. — М. : Машиностроение, 2005. — С. 656.
17. Моделирование магнитных систем ЭМА—преобразователей для возбуждения ультразвуковых волн [Текст] / С.Г. Алехин, А.А. Самокрутов, В.Т. Бобров [и др.] // Контроль. Диагностика. — 2013. — № 7. — С. 12–18.
18. Остроумов, Б. Ридиотехнический метод испытаний металлов [Текст] / Б. Остроумов, Л. Полотовский // Вестник металлопромышленности. — 1933. — № 5. — С. 31–33.
19. Rabdall, R. Intercrystalline thermal current as a source of internal friction [Text] / R. Rabdall, C. Zener, F. Rose // Phys. Rev. — 1939. — Vol. 56. — P. 343–348.
20. Буденков, Г.А. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (обзор) [Текст] / Г.А. Буденков, С.Ю. Гуревич // Дефектоскопия. — 1981. — № 5. — С. 5–33.
21. Шкарлет, Ю.М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля [Текст] / Ю.М. Шкарлет. — М. : Машиностроение, 1974. — С. 56.
22. Шкарлет, Ю.М. Основы общей теории возбуждения акустических колебаний гармоническими полями сил [Текст] / Ю.М. Шкарлет // Дефектоскопия. — 1974. — № 3. — С. 84–92.
23. Шкарлет, Ю.М. Вопросы общей теории и практического применения электромагнитно-акустического и электромагнитных методов неразрушающего контроля [Текст]: автореф. дисс. ... доктор технических наук / Шкарлет Юрий Михайлович — Свердловск: ИФМ, 1974. — 31с.

24. Шубаев, С.Н. Анализ акустического поля, возбуждение электромагнитным методом [Текст] / С.Н. Шубаев // Дефектоскопия. — 1974. — № 3. — С. 100–109.
25. Шубаев, С.Н. Возбуждение упругих волн в металлическом полупространстве электромагнитным методом [Текст] / С.Н. Шубаев // Дефектоскопия. — 1974. — № 2. — С. 45–55.
26. Буденков, Г.А. Электромагнитная генерация ультразвуковых колебаний в магнитострикционных средах [Текст] / Г.А. Буденков, С.Ю. Гуревич, А.Ф. Маскаев // Сб. научн. трудов Челябинского политехн. ин-та. — 1980. — № 242. — С. 11–29.
27. Гуревич, С.Ю. Основы теории и практического применения высокотемпературного ультразвукового контроля ферромагнитных металлоизделий [Текст]: автореф. дисс. ... доктор технических наук / Гуревич Сергей Юрьевич — Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 1996. — 43с.
28. Комаров, В.А. Теория физических полей. Том 3: Связанные поля [Текст] / В.А. Комаров, В.Ф. Мужичский, С.Ю. Гуревич. — Челябинск-Ижевск : Из-во ЮУрГУ, 2000. — С. 627.
29. Ильин, И.В. Исследование электромагнитно-акустического метода возбуждения и приёма волн Рэлея в ферромагнетиках [Текст]: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. / И.В. Ильин — Л.: ЛЭТИ, 1979. — 162с.
30. Ильин, И.В. К теории ЭМА метода приёма волн Рэлея в ферромагнитных и ферримагнитных материалах [Текст] / И.В. Ильин, А.В. Харитонов // Дефектоскопия. — 1980. — № 7. — С. 86–93.
31. Шубаев, С.Н. Переменные поля, возникающие при электромагнитном методе приёма волн Рэлея и Лэмба [Текст] / С.Н. Шубаев, Ю.М. Шкарлет // Дефектоскопия. — 1972. — № 6. — С. 62–68.

32. Шубаев, С.Н. Расчёт датчиков, применяемых при электромагнитном приёме волн Рэлея и Лэмба [Текст] / С.Н. Шубаев, Ю.М. Шкарлет // Дефектоскопия. — 1973. — № 1. — С. 81–89.
33. Kavashima, K. Theory and numerical calculation of the acoustic field produced in metal by an electromagnetic ultrasonic transducer [Text] / K. Kavashima // J. Acoust. Soc. Amer. — 1976. — Vol. 66, no. 5. — P. 1089–1099.
34. Thompson, R. Electromagnetic generation of rayleigh and lamb waves in ferromagnetic materials [Text] / R. Thompson / Proceeding Ultrasonic Symposium. — N.Y. : [s. n.], 1975. — P. 633–636.
35. Thompson, R.B. Measurements of with emat transducers [Text] / R.B. Thompson // Physical Acoustic. — 1990. — Vol. XIX, no. V. — P. 164–200.
36. Shevaldykin, V.G. Emat transformation in pulsed magnetic field and its use in portable instruments for acoustic measurements [Text] / V.G. Shevaldykin, V.T. Bobrov, S.G. Alekhin // Book of Abstracts of 16th World Conference on Nondestructive Testing. — Montreal, Canada : [s. n.], 2004. — August 30 - September 3. — P. 88.
37. Advanced electro magnetic acoustic transducer (emat), technology for determining stress corrosion cracking (scc) [Text] : Rep. ; Executor: J. Aron, J. Gore. — Des Plaines : Gas Research Institute, 2002. — P. 62.
38. Development of an emat in-line inspection system for detecting, discrimination, and grading of stress corrosion cracking in pipelines: final report (phase i) [Text] : Rep. ; Executor: J. Aron, J. Lia, B. Vance [et al.]. — Pittsburg : The U.S. Department of Energy's (DOE) National Energy Technology, 2005. — P. 59.
39. Лончак, В.А. Скоростной контроль рельсов с применением бесконтактных

- преобразователей [Текст] / В.А. Лончак // Материалы конференции «Ультразвуковые методы НК». — Киев : [б. и.], 1970. — С. 97–98.
40. Бутенко, А.И. Толщинометрия труб импульсным электромагнитно-акустическим методом [Текст] / А.И. Бутенко // Дефектоскопия. — 1973. — № 3. — С. 7–12.
41. Буденков, Г.А. Цифровой ультразвуковой толщиномер ТЭМАЦ-1 [Текст] / Г.А. Буденков, С.Н. Бедов, Ю.В. Волегов // Информационный листок. — 1974. — № 482.
42. Козлов, В.Н. Исследование корреляционных методов обработки акустических сигналов и разработка ультразвуковых толщиномеров с расширенным диапазоном измерений. [Текст]: дисс. ... канд. технических наук. / Владимир Николаевич Козлов - М.: ЗАО «НИИИ МНПО «СПЕКТР», 2002. — 95с.
43. Сучков, Г.М. Возможности современных ЭМА толщиномеров [Текст] / Г.М. Сучков // Дефектоскопия. — 2004. — № 10. — С. 16–25.
44. Васильев, А.Н. Электромагнитное возбуждение звука в металлах [Текст] / А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, С.Ю. Гуревич. — Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2001. — С. 339.
45. Masahiko, H. EMATS for science and industry non contacting ultrasonic measurements [Text] / H. Masahiko, O. Hirotsugu. — Boston : Kluwer Academic Publishers, 2003. — P. 372.
46. Щербинин, В.Е. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля [Текст] / В.Е. Щербинин, Э.С. Горкунов. — Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 1996. — С. 266.

47. Pechenkov, A.N. Analytical model of a pipe magnetization by two parallel linear currents [Text] / A.N. Pechenkov, V.E. Shcherbinin, J.G. Smorodinskiy // NDT & E International. — 2011. — Vol. 44, no. 8. — P. 718–720.
48. Василенко, О.Н. Методы и средства многопараметровой магнитной структуроскопии изделий с использованием составных разомкнутых магнитных цепей. [Текст]: дисс. ... канд. технических наук. / Ольга Николаевна Василенко – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2014. – 131с.
49. Finite Element Method Magnetism [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (дата обращения: 19-06-2017).
50. ANSYS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ansys.com/> (дата обращения: 19-06-2017).
51. Elmer [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.elmerfem.org/doxygen/index.html> (дата обращения: 19-06-2017).
52. Elcut [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://elcut.ru/> (дата обращения: 19-06-2017).
53. Лопатин, В.В. Применение электромагнитного акустического метода в практике контроля состояния труб магистральных газопроводов [Текст] / В.В. Лопатин, С.В. Попов, В.А. Канайкин // Дефектоскопия. — 1959. — Т. 5, № 7. — С. 3–11.
54. BS EN 1330-4:2000. Non-destructive testing - Terminology - Part 4: Terms used in ultrasonic testing.
55. Викторов, И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике [Текст] / И.А. Викторов. — М. : Наука, 1966. — С. 168.

56. Викторов, И.А. Квазирэлеевские волны в упругом слое [Текст] / И.А. Викторов, Р.А. Григорян // Акустический журнал. — 1959. — Т. 5, № 3. — С. 366–368.
57. Halbach, K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material [Text] / K. Halbach // Nuclear instruments and methods. — 1980. — Vol. 169. — P. 1–10.
58. Cugat, O. A 4-tesla permanent magnet flux source [Text] / O. Cugat, F. Bloch, J.C. Toussaint / 15th Rare-earth magnets and their applications. International workshop. — [S. l. : s. n.], 1998. — P. 853–860.
59. Пат. 108626 Российская Федерация, МПК G 01 N 27/27. Устройство для локального измерения ферромагнитной фазы материалов [Текст] / Ю.Л. Гобов, А.В. Михайлов, А.П. Новослугина; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Ордена Трудового Красного Знамени Институт физики металлов Уральского отделения РАН — № 2011104238/28; заявл. 07.02.2011; опубл. 20.09.2011, Бюл. № 26. — 2с.
60. Leupold, H.A. Augmentation of field uniformity and strength spherical and cylindrical magnetic field sources [Text] / H.A. Leupold, G.F. McLane // J. Appl. Phys. — 1991. — Vol. 70(10), no. 15. — P. 6621–6623.
61. Leupold, H.A. Fabrication of multipolar magnetic field sources [Text] / H.A. Leupold // J. Appl. Phys. — 1994. — Vol. 76(10), no. 15. — P. 6253–6255.
62. Zhakov, S.V. Optimization of permanent magnet system for height frequency electronics and nmr applications [Text] / S.V. Zhakov / Proc. XV Int. Workshop on REM and their Application. — Vol. 2. — Dresden : [s. n.], 1998. — P. 875.
63. Joseph, R.J. Demagnetizing field in nonellipsoidal bodies [Text] / R.J. Joseph, E. Schlomann // J. Appl. Phys. — 1965. — Vol. 36, no. 5. — P. 1579–1593.

64. Несбитт, Е. Постоянные магниты на основе редкоземельных элементов [Текст] / Е. Несбитт, Дж. Верник. — М. : Мир, 1977. — С. 168.
65. Самофалов, В.Н. Сильные поля рассеяния в системах магнитов с гигантской магнитной анизотропией [Текст] / В.Н. Самофалов, Д.П. Белозеров, А.Г. Равлик // Успехи физических наук. — 2013. — Т. 183, № 3. — С. 287–306.
66. Жаков, С.В. Получение максимальных магнитных полей с помощью постоянных магнитов [Текст] / С.В. Жаков // Физика металлов и металловедение. — 2003. — Т. 96, № 6. — С. 18–22.
67. Липунов, В.М. Астрофизика нейтронных звезд [Текст] / В.М. Липунов. — М. : Наука, 1987. — С. 296.
68. А1207 – ультразвуковой толщиномер нового поколения [Текст] / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин, В.Н. Козлов [и др.] // В мире неразрушающего контроля. — 2001. — № 2. — С. 23–24.
69. ЭМА преобразователи для ультразвуковых измерений [Текст] / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин, В.Н. Козлов [и др.] // В мире неразрушающего контроля. — 2008. — № 2. — С. 22–25.
70. Толщинометрия труб импульсным электромагнитно-акустическим методом [Текст] / А.И. Бутенко, А.В. Малинка, В.И. Стефаров, Ю.М. Шкарлет // Дефектоскопия. — 1973. — № 3. — С. 7–12.
71. Выявляемость дефектов в трубопроводах из различных марок стали в зависимости от их конфигурации [Текст] / П.А. Халилеев, Б.В. Патраманский, В.Е. Лоскутов [и др.] // Дефектоскопия. — 2000. — № 8. — С. 22–23.
72. Rosenberg, E. Wirbelstromе in massivem eisen [Text] / E. Rosenberg // Elektrotechn. Zs. — 1923. — Vol. 44. — P. 513–518.



73. Rosenberg, E. Massive eisenleiter und wirbelstrombremsen [Text] / E. Rosenberg // Elektrotechn. Zs. — 1923. — Vol. 44. — P. 1055–1057, 1074–1078.
74. Мышкин, А.В. Влияние конструктивных параметров многоэлементных фазированных преобразователей на формирование акустических полей. [Текст]: автореф. дисс. ... канд. технических наук. / Андрей Владимирович Мышкин - Ижевск: ВГБОУ ВПО ЗАО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова», 2015. — 175с.
75. Ильясов, Р.С. Импульсное электромагнитно-акустическое преобразование высших гармоник поверхностных волн в ферромагнетиках [Текст] / Р.С. Ильясов, С.Э. Бабкин // Дефектоскопия. — 1995. — № 8. — С. 53–60.
76. Ильясов, Р.С. Электромагнитная генерация высших ультразвуковых гармоник вблизи точки Кюри [Текст] / Р.С. Ильясов, В.А. Комаров, В.В. Мерзляков // ФММ. — 1992. — № 1. — С. 148–150.
77. Нелинейное ЭМАП в кремнистом железе [Текст] / Р.С. Ильясов, В.А. Комаров, В.В. Мерзляков, В.И. Рубцов // ФММ. — 1993. — Т. 75, № 5. — С. 54–59.
78. Комаров, В.А. Излучение прямого и обратного электромагнитно-акустического преобразования в ферромагнитных стержнях [Текст] / В.А. Комаров, П.С. Кононов // Дефектоскопия. — 1978. — № 5. — С. 20–26.
79. Полякова, А.Л. Нелинейные явления в магнитострикционных излучателях звука [Текст] / А.Л. Полякова // Акустический журнал. — 1975. — Т. 21, № 4. — С. 605–611.
80. Мирсаев, И.Ф. Нелинейная магнитоупругая генерация поперечных звуковых волн в ферромагнетиках [Текст] / И.Ф. Мирсаев, В.В. Меньшенин, Е.А. Туров // ФТТ. — 1986. — Т. 28, № 8. — С. 2428–2434.

81. Электро-магнитно-акустический дефектоскоп ЭМАД 2-01 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://lmaster.com.ua/rus\\_defect.php?lang=rus&page\\_id=65](http://lmaster.com.ua/rus_defect.php?lang=rus&page_id=65) (дата обращения: 19-06-2017).
82. Дефектоскоп электромагнитно-акустический ЕМАСОН-01 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.promprilad.ua/ema\\_1.html](http://www.promprilad.ua/ema_1.html) (дата обращения: 19-06-2017).
83. Ультразвуковой дефектоскоп DIO 1000 SFE [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ekb.ank-ndt.ru/produkcziya/ultrazvukovoj-kontrol/ultrazvukovyie-defektoskopyi/dio-1000-sfe.html> (дата обращения: 19-06-2017).
84. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-2М [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ferta2.narod.ru/UZD2M.html> (дата обращения: 19-06-2017).
85. «СТАЛКЕР МД10» - Радиоуправляемый ЭМА толщиномер [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.votum.ru/catalog/promyshlennye-ustanovki/stalker-md10-radioupravlyaemu-ema-tolshchinomer> (дата обращения: 19-06-2017).
86. Автоматизированный сканер-дефектоскоп «Автокон-ЭМА-МГТУ» [Текст] / Н.П. Алешин, М.М. Сыркин, М.В. Григорьев, Д.М. Козлов // Сварка и Диагностика. — 2009. — № 4. — С. 28–31.
87. Сканер-дефектоскоп А2075 SoNet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.acsys.ru/production/detail/a2075-sonet/> (дата обращения: 19-06-2017).
88. Опыт применения комплекса диагностических методов и средств при переизоляции газопроводов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.npcmolniya.ru/razrabotki-kompanii/metodicheskie-razrabotki/>

76-opyt-primeneniya-kompleksa-diagnosticheskikh-metodov-i-/  
sredstv-pri-pereizolyatsii-gazoprovodov (дата обращения:  
19-06-2017).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Обзор выпускаемых приборов для автоматизированного УЗК длинномерных ферромагнитных объектов ЭМА способом

В этой части работы рассматриваются выпускаемые приборы для автоматизированного и ручного УЗК длинномерных ферромагнитных объектов ЭМА способом.

#### Дефектоскоп ЭМАД 2-01

Дефектоскоп ЭМАД 2-01 (рисунок А.1) выпускается в настоящее время украинской компанией ООО «УкрАвиаЗаказ» и предназначен для: ручного неразрушающего контроля сырья, готовых изделий, полуфабрикатов, сварных, паяных и других соединений из ферромагнитных материалов на наличие в них нарушений сплошности и однородности в виде трещиноподобных дефектов в том числе с черновой необработанной или корродированной поверхностью, через слой твёрдого диэлектрика или воздушный зазор в замен магнитопорошкового контроля [81].

Дефектоскоп позволяет: измерять координату и эквивалентную глубину трещиноподобных дефектов; определять тип (выходящие или не выходящие на поверхность) трещиноподобных и других дефектов.

Дефектоскоп может применяться для контроля изделий из ферромагнитных металлов при их изготовлении и эксплуатации в различных отраслях промышленности: машиностроении, металлургии, железнодорожном, авиационном, автомобильном и трубопроводном транспорте, судостроении, энергетике, строительстве.

ЭМАД 2-01 имеет ряд преимуществ перед существующими на сегодняшний день методами и приборами неразрушающего контроля. Эти преимущества заключаются в следующем: простота, удобство использования, возможность ручного сканирование объекта, высокая скорость подготовки прибора к работе; применение ЭМАД 2-01 позволяет исключить использование одновременно



Рисунок А.1 — Внешний вид дефектоскопа ЭМАД 2-01

нескольких методов и приборов для неразрушающего контроля; очень низкие значения погрешностей определения координат и основных геометрических параметров дефектов; разнообразная форма преобразователей и физика процесса контроля дают возможность обследовать изделия практически всех размеров и форм; для проведения контроля не требуются расходные материалы, контактная жидкость, снятие изоляционного покрытия и тщательная обработка поверхности контролируемого объекта (дефектоскоп сохраняет работоспособность при контроле изделий с высотой неровностей поверхности до 4 мм и при контроле изделий, имеющих на поверхности слой загрязнений и непроводящих покрытий различной природы толщиной до 6 мм).

Дефектоскоп ЭМАД 2-01 не подходит для контроля длинномерных ферромагнитных объектов, линейный размер которых превышает 500 мм. Дефектоскоп реализует волноводный способ контроля с помощью волн Рэлея. При этом возбуждённая волна быстро затухает: об этом говорит максимально допустимое расстояние между излучающим и приёмным ЭМА преобразователями, соот-

Таблица А.1 — Технические характеристики дефектоскопа ЭМАД 2-01

№	Наименование параметра	Значение
1	Габаритные размеры ИБ дефектоскопа, мм	45×108×220
2	Габаритные размеры КПК дефектоскопа, мм	45×90×160
3	Напряжения питания аккумуляторной батареи, В	14,4
4	Максимальное расстояние до поверхности объекта, мм	6
5	Минимальная глубина выявляемого дефекта, мм	0,2
6	Ширина полосы контроля широкозахватным датчиком, мм	100
7	Ширина полосы контроля одноканальным датчиком, мм	20
8	Расстояний между излучающим и приёмным преобразователями, мм	от 80 до 500

ветствующее 500 мм. Это происходит вследствие недостаточности поляризующего поля, создаваемого намагничивающей системы ЭМА преобразователя малых размеров, а также недостаточной мощности генератора зондирующих импульсов. Также имеет место большая величина мёртвой зоны, длина которой составляет 80 мм.

### **Дефектоскоп электромагнитно-акустический ЕМАСОН-01**

Универсальный ЭМА дефектоскоп «ЕМАСОН-01» (рисунок А.2) выпускается в настоящее время китайской компанией Kewetest и предназначен для ручного и механизированного контроля продукции на наличие дефектов типа нарушения сплошности и однородности материалов, изделий и полуфабрикатов, сварных соединений, измерения отношения амплитуд сигналов от дефектов, глубины и координат их залегания, а также проведения толщинометрии, проведения неразрушающего контроля и измерение толщины деталей и узлов из металлов и сплавов, контроля непрочности в соединениях тонких алюминиевых пластин. Прибор адаптирован для использования как в полевых условиях, так в цехах и лабораториях предприятий [82].



Рисунок А.2 — Внешний вид дефектоскопа EMACON-01

Технические характеристики дефектоскопа приведены в таблице А.2.

В дефектоскопе-толщиномере используется ЭМА способ возбуждения и приёма сдвиговых колебаний, позволяющий проводить измерения без контактной жидкости, без зачистки поверхности, через воздушный зазор или непроводящее покрытие (краска, лак, эмаль, пленка) до 2 мм.

Таблица А.2 — Технические характеристики дефектоскопа EMACON-01

№	Наименование параметра	Значение
1	Количество каналов	два на выбор (0,2; 0,4; 1; 2; 3; 5 МГц )
2	Частота повторений (ГЗИ), Гц	5-100
3	Диапазон измерения, мм	0–3000
4	Задержка , мм	0–3000
5	Общий диапазон контроля, мм	0–6000
6	Питание сетевое, В	220, 50 Гц;
7	Питание автономное, аккумуляторное, В	+12
8	Габаритные размеры электронного блока, мм	247×147×80
9	Масса прибора с источником питания, кг	3,5

### Преимущества дефектоскопа:

- проведение контроля через изолирующий слой либо воздушный зазор;
- наличие специальных режимов работы и дополнительных функций:

- сохранение и просмотр данных в режимах Б-скан и А-скан, А-скан + Б-скан,
- внешняя синхронизация от ДП,
- функции ВРЧ и ДАС кривых,
- сохранение и просмотр данных на ПК;
- эргономичность дефектоскопа при работе на объекте:
  - большой TFT-дисплей,
  - малый вес прибора,
  - удобная навигация по меню,
  - использование «горячих» клавиш,
  - наличие автоматической звуковой и световой сигнализации дефектов по трем уровням -поисковый, контрольный, браковочный;
- комплектация специализированными сканирующими устройствами для удобного перемещения ЭМА преобразователя по контролируемой поверхности.

Основной недостаток дефектоскопа ЕМАСОН-01 заключается в том, что он представляет собой ЭМА толщиномер и не реализует волноводный способ контроля. В случае длинномерных объектов контроля это является существенным недостатком, так как сильно усложняет и увеличивает время проведения процесса сканирования основного материала объекта контроля.

### **Ультразвуковой дефектоскоп DIO 1000 SFE**

Высокочастотный ультразвуковой дефектоскоп DIO 1000 SFE (рисунок А.3) разработан и выпускается в настоящее время чешской компанией «STARMANS ELECTRONICS» и сочетает в себе традиционные способы выявления дефектов и самые современные и новейшие технологии контроля: бесконтактный ЭМА метод; дифракционно-временной метод, с возможностью применения необходимых сканеров и преобразователей; 12 многофункциональных клавиш; функция тригонометрического вычисления положения дефекта;





Рисунок А.3 — Внешний вид дефектоскопа DIO 1000 SFE

вычисление глубины залегания дефекта; сигнал отображается на дисплее с фиксацией максимума в месте действия строга.

DIO 1000 SFE имеет достаточно мощное программно-аппаратное обеспечение, благодаря которому обеспечиваются интуитивное управление и высокая скорость контроля.

Технические характеристики дефектоскопа приведены в таблице А.3. Ультразвуковой дефектоскоп DIO 1000 SFE может успешно применяться в авиационной отрасли для осуществления контроля за качеством цветных и композитных материалов, в автомобильной промышленности для контроля качества в местах точечной сварки, в железнодорожной отрасли для контроля качества материалов из различных сталей, включая с содержанием марганца, в литейной отрасли для контроль проката, поковок и других деталей, в нефтегазовой промышленности для контроля качества сварных соединений в трубопроводах, выявления коррозии, а также исследование эксплуатируемых труб, которые выполнены из пластика и металлов, в энергетической отрасли для осуществле-

Таблица А.3 — Технические характеристики дефектоскопа DIO 1000 SFE

№	Наименование параметра	Значение
1	Скорость ультразвука, м/с	от 100 до 15240
2	Рабочие частоты, МГц	0,5–30
3	Диапазон измерения толщины, мм	от 1 мм до 29 000 мм
4	Дискретность измерения толщины, мм	0,01
5	динамический диапазон, дБ	111

ния контроля фланцев, ступиц, валов, а также для исследования аустенитных швов [83].

Дефектоскоп DIO 1000 SFE также может применяться в других отраслях промышленности, где необходим ультразвуковой контроль ответственных деталей и конструкций.

Основные преимущества дефектоскопа DIO 1000 SFE:

- малый вес и габариты - малый вес (1,3 кг) и габариты (220×180×30 мм) позволяют использовать прибор в труднодоступных местах;
- возможность подключения и осуществления контроля с применением сканера, использующего дифракционно-временной метод;
- антибликовый, высококонтрастный дисплей, имеющий высокую разрешающую способность;
- мощный аккумулятор. Время непрерывной работы - 10 часов;
- возможность подключения видео и фотокамеры, для фотографирования объектов контроля;
- возможность осуществлять контроль без применения контактной жидкости;
- широкий набор прикладных функций, необходимых для дефектоскописта:
  - сигнал отображается на дисплее с фиксацией максимума в месте действия строба, привязка пика к W - развёртке, благодаря этому значительно облегчается определение положения дефекта по глубине,

- функция тригонометрического вычисления положения дефекта, с возможностью корректировки на искривленных поверхностях,
- вычисление глубины залегания дефекта, а также траектории ультразвука к данному дефекту производится автоматически,
- режим автокалибровки, упрощающий и ускоряющий настройку дефектоскопа DIO 1000 SFE.

Дефектоскоп DIO 1000SFE сертифицирован в Федеральном Агентстве по техническому регулированию и метрологии РФ (Свидетельство об утверждении типа средства измерения RU.C.27.003.A №42840), зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под №46948-11 и допущен к применению на территории Российской Федерации.

Недостатки аналогичны дефектоскопу EMACON-01.

### **Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-2М**

УЗД-2М (рисунок А.4) - ультразвуковой дефектоскоп специализированный с расширенными возможностями, реализующий эхо, зеркально-теневой и теневой методы неразрушающего контроля дефектов макроструктуры продукции, определение коррозионного износа по остаточной толщине с использованием бесконтактных электромагнитно-акустических и серийно-выпускаемых пьезоэлектрических преобразователей [84]. Дефектоскоп разработан и выпускается в настоящее время украинской компанией ООО НПФ «ФЕРТА». Технические характеристики дефектоскопа приведены в таблице А.4

#### **Особенности дефектоскопа:**

- малогабаритность, цифровое управление;
- возбуждение и приём ультразвуковых волн пьезоэлектрическими преобразователями;
- возбуждение и приём сдвиговых ультразвуковых волн электромагнитно-акустическим методом (угол ввода  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ );
- система автоматической сигнализации дефектов;

Таблица А.4 — Технические характеристики дефектоскопа УЗД-2М

№	Наименование параметра	Значение
1	Диапазон рабочих частот, МГц	1,00-2,50
2	Диапазон измеряемых толщин, мм	
	- с помощью ЭМА:	5-200
	- с помощью ПЭП:	5-2500
3	Динамический диапазон, дБ	220
4	Глубина регулировки чувствительности, дБ	130
5	Длительность развертки, мкс	50-2000
6	Погрешность измерения координат дефекта, мм	не более 0,5
7	Размеры, мм	170×270×155
8	Масса без аккумулятора, кг	3



Рисунок А.4 — Внешний вид дефектоскопа УЗД-2М

- система автоматической регулировки порога срабатывания;
- плавная настройка частоты возбуждения;
- возможность измерения толщины проката, расстояния до дефекта и отношений амплитуд сигналов;
- интуитивный интерфейс, организованный 9 кнопками и системой меню;
- информация выводится на одном из 3 языков (Рус/Укр/Англ);
- возможность запоминания до 80 А-Скан и настроек;
- режимы «электронная лупа», «заморозка»;
- режим «заливки» детектированного сигнала;
- возможность регулировки контрастности и инвертирования изображения экрана;
- протоколирование процедуры контроля с использованием универсального программного обеспечения FERTA-WORK версии 1.1.5.44;
- возможность загрузки в память дефектоскопа ранее сохраненных в ПЭВМ настроек и А-Скан.

Недостатки аналогичны дефектоскопам ЭМАД 2-01 и ЕМАСОН-01

### **«СТАЛКЕР» МД10**

«СТАЛКЕР» МД10 (рисунок А.6) разработан и выпускается в настоящее время московской компанией ООО «НПК «ТЕХНОВОТУМ» и предназначен для измерения толщины, обнаружения трещин, расслоений, и др. дефектов в стальных трубопроводах. Беспроводное сканирующее устройство «СТАЛКЕР» МД10 может перемещаться вдоль и поперек образующих, по сварным швам и в любых направлениях по команде оператора [85]. Управление движением «СТАЛКЕР» МД10 задаётся с пульта или управляющего компьютера по радио тракту на удаление до 50 м.

Сканирующее устройство оборудовано видеокамерой, передающей по отдельному радиоканалу изображение текущего участка контроля для визуальной оценки его состояния. Применение СТАЛКЕРА в качестве удалённого модуля неразрушающего контроля позволяет оператору осуществить контроль, на-

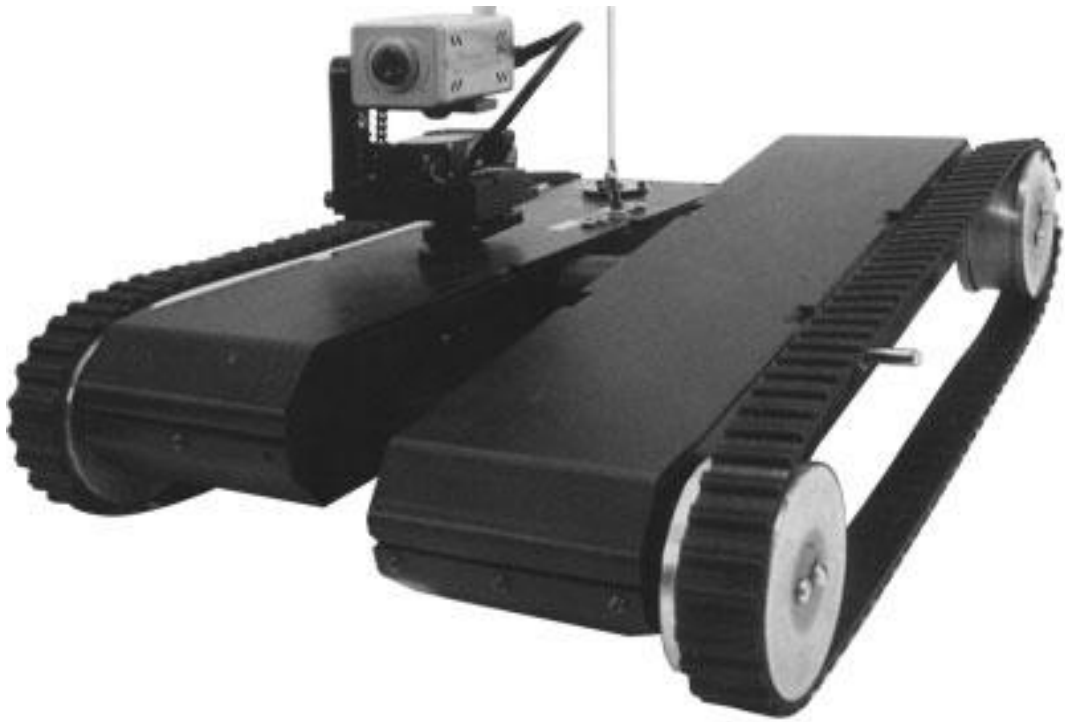


Рисунок А.5 — Внешний вид радиоуправляемого ЭМА толщиномера «СТАЛКЕР» МД10

ходясь в более комфортных условиях, вдали от работающих механизмов и агрессивных сред.

Автоматизированная система «СТАЛКЕР» МД10 состоит из двух частей:

- сканирующее устройство в виде тележки со сменными кассетами: ЭМА (электромагнитно-акустических) и/или вихретоковых преобразователей и аппаратурой обработки сигналов;
- персональный компьютер типа «ноутбук» со специализированным программным обеспечением для настройки параметров акустического тракта, приёма и визуализации полученной информации, сохранения и документирования результатов контроля.

Оператор СТАЛКЕРА самостоятельно задаёт зоны контроля и необходимую классификацию дефектов в соответствии с нормативными требованиями. Обработка всех данных контроля выполняется в режиме реального времени. Он также формирует вариант итогового протокола: общий (с указанием дефектных зон) и детальный (с указанием типа и размеров дефектов). Предусмотрена возможность остановки тележки при выявлении дефекта.

Таблица А.5 — Технические характеристики «СТАЛКЕР» МД10

№	Наименование параметра	Значение
1	Скорость контроля, измерений/с	41000
2	Диаметр контролируемых труб, мм	720-1420
3	Максимальная скорость перемещения на ровной, горизонтальной поверхности, м/с не менее	0,5
4	Автономный встроенный источник питания	+12V DC
5	Питание от сети	220-240V, 50Гц
6	Среднее значение мощности в рабочем режиме	не более 40 VA
7	Чистота поверхности	50 микрон

Учитывая целесообразность комплексной оценки параметров дефекта в системе предусмотрена интеграция нескольких методов неразрушающего контроля с применением комбинированных блоков преобразователей. В зависимости от условий контроля, применяются бесконтактные прямые ЭМА преобразователи (Е411-2,5-К12) и ЭМА преобразователи поверхностной волны (Е411-1,0-90) с рабочим зазором от 0,5–1,5 мм. Предусмотрена также поддержка вихретоковых преобразователей типа ВТП-3. Таким образом, потребителям «СТАЛКЕР» МД10 предоставляется самостоятельность принятия решения относительно выбора дефектоскопического оборудования.

Технические характеристики радиуправляемого ЭМА толщиномера «СТАЛКЕР» МД10 представлены в таблице А.5.

Так же как и остальные приборы дефектоскоп «СТАЛКЕР» МД10 представляет собой ЭМА толщиномер и предназначен, в первую очередь, для контроля продольных и поперечных сварных швов. Для контроля основного материала объекта контроля необходимы множественные проходы со сложной траекторией движения. При этом возможны пропуски отдельных участков объекта, а сам процесс контроля затягивается по времени.

### **Автокон-ЭМА-МГТУ**

Сканер «Автокон-ЭМА-МГТУ» (рисунок А.6) разработан в 2009 году НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Е. Баумана совместно с ИФМ УрО РАН и ЗАО НПО «Интротест». В основу работы сканера заложен принцип ввода ультразвуковой волны в тело объекта контроля с помощью электромагнитноакустического преобразователя через зазор [86]. Сканер предназначен для УЗК основного металла (тела трубы) и продольных сварных швов магистрального газопровода диаметром 720–1420 мм на наличие дефектов типа нарушения сплошности или однородности материала. Сканер позволяет проводить контроль со средней скоростью движения не менее 2 м/мин, определять координаты обнаруженных дефектов и их условные размеры. На несущей балке закреплены блок электронный (дефектоскоп), блок питания аккумуляторный, колёса ведомые, выполняющие роль намагничивающего устройства с подвесом ЭМА-преобразователя; на поворотной балке – привод передвижения и блок управления приводом, объединённый с датчиком слежения за швом.

Конструкция подвеса ЭМА преобразователей обеспечивает постоянный зазор правого и левого ЭМА преобразователя относительно поверхности изделия. ЭМА преобразователь представляет собой конструкцию, состоящую из намагничивающего устройства в виде колёсной пары и катушек возбуждения и регистрации ультразвуковых волн. Данная конструкция обеспечивает свободное перемещение преобразователя по изделию без снижения чувствительности контроля благодаря получению замкнутого магнитного поля без воздушных зазоров в магнитной цепи намагничивающего элемента. Отсутствие сердечника над чувствительным элементом и демпфирование магнитопровода изделием уменьшают амплитуду паразитных электромагнитно-акустических колебаний, что увеличивает соотношение сигнал/шум. Катушки возбуждения каждого ЭМА преобразователя образуют фазированную решётку, обеспечивающую направленное излучение и приём ультразвуковых волн и переключение направления излучения и приёма. Кроме того, наличие двух ЭМА преобразовате-





Рисунок А.6 — Внешний вид ультразвукового бесконтактного сканера-дефектоскопа «Автокон-ЭМА-МГТУ»

лей позволяет одним ЭМА преобразователем контролировать полосу трубы, находящуюся в мёртвой зоне другого ЭМА преобразователя и наоборот. Осуществляемая с помощью фазированной решётки селекция волн, приходящих с разных направлений, позволяет однозначно идентифицировать расположение дефекта относительно линии движения сканера и уверенно обнаруживать дефекты на противоположной стороне трубы, где этому значительно мешает сигнал, обежавший вокруг трубы (с таким же временем задержки). Технические характеристики сканера «Автокон-ЭМА-МГТУ» приведены в таблице А.6.

Конструкция привода и системы слежения за швом прибора «Автокон-ЭМА-МГТУ» позволяет ему передвигаться как вдоль продольного сварного шва с автоматическим слежением (при этом достигается максимальная выявляемость дефектов по всему телу трубы), так и по произвольной траектории при углах до  $20^\circ$  относительно продольного шва. Это существенно упрощает установку и снятие прибора с трубы, а главное, значительно повышает безопасность работы (прибор устанавливают на доступный участок тела трубы, затем с помощью радиокомандного метода выводят на траекторию контроля),

Таблица А.6 — Техническая характеристика прибора «Автокон-ЭМА-МГТУ»

№	Наименование параметра	Значение
1	Диаметр контролируемых труб, мм	720–1420
2	Толщина стенки трубы, мм	8–14
3	Скорость сканирования, м/мин	2,1
4	Скорость сканирования, м/мин	2,1
5	Масса прибора, кг	39
6	Минимальные размеры обнаруживаемого дефекта (продольного пропила), глубина (% толщины трубы) × длина, мм	10×10
7	Максимальный зазор между преобразователем и изделием, мм	2
8	Время непрерывной автономной работы, ч	> 4

то есть без применения лестниц-стремянки и подъёмных устройств.

К недостаткам сканера можно отнести использование в качестве намагничивающих систем ЭМА преобразователей двух магнитных колёс массой 15 кг каждое, а также низкую эффективность ЭМА преобразования при контроле труб с толщиной стенки более 10 мм.

### **A2075 SoNet**

Ультразвуковой бесконтактный сканер-дефектоскоп «A2075 SoNet» (рисунок А.7) разработан и выпускается в настоящее время московской компанией ООО «АКС» и предназначен для решения задачи автоматизированного поиска дефектов в стенках металлических труб диаметром от 720 мм до 1420 мм с толщиной стенки от 6 мм [87].

Основной областью применения сканера является работа в составе дефектоскопических комплексов, предназначенных для решения задачи диагностики газопроводов, нефтепроводов, продуктопроводов при выполнении работ по строительству или ремонту.

Сканер-дефектоскоп успешно решает задачи поиска и обнаружения стресс-коррозионных и других видов поверхностных и внутренних дефектов труб. Технические характеристики сканера-дефектоскопа приведены в таблице А.7.



Рисунок А.7 — Внешний вид ультразвукового бесконтактного сканера-дефектоскопа «А2075 SoNet»

Контроль выполняется путём автоматизированного перемещения сканирующего устройства вдоль трубы по её внешней поверхности. При этом производится 100 % прозвучивание тела трубы по окружности, регистрация эхосигналов от дефектов и определение их координат с целью дальнейшего измерения параметров дефектов с помощью дополнительных дефектоскопических средств.

Принцип работы устройства основан на волноводном эхо-импульсном методе контроля. Ультразвуковые колебания в металлическом теле трубы возбуждаются и принимаются бесконтактно (без применения контактной жидкости) с помощью электромагнитно-акустического преобразователя. Связь между персональным компьютером оператора и сканером-дефектоскопом осуществляется посредством Wi-Fi связи, что обеспечивает большую мобильность оператора и возможность дистанционного контроля. Постобработка сканограмм позволяет обработать результаты контроля в лабораторных условиях с указанием величины, местоположения, ориентации и типа дефекта. Блочная структура сканера-дефектоскопа позволяет обеспечить высокую ремонтпригодность и быструю замену блоков в полевых условиях одним оператором.

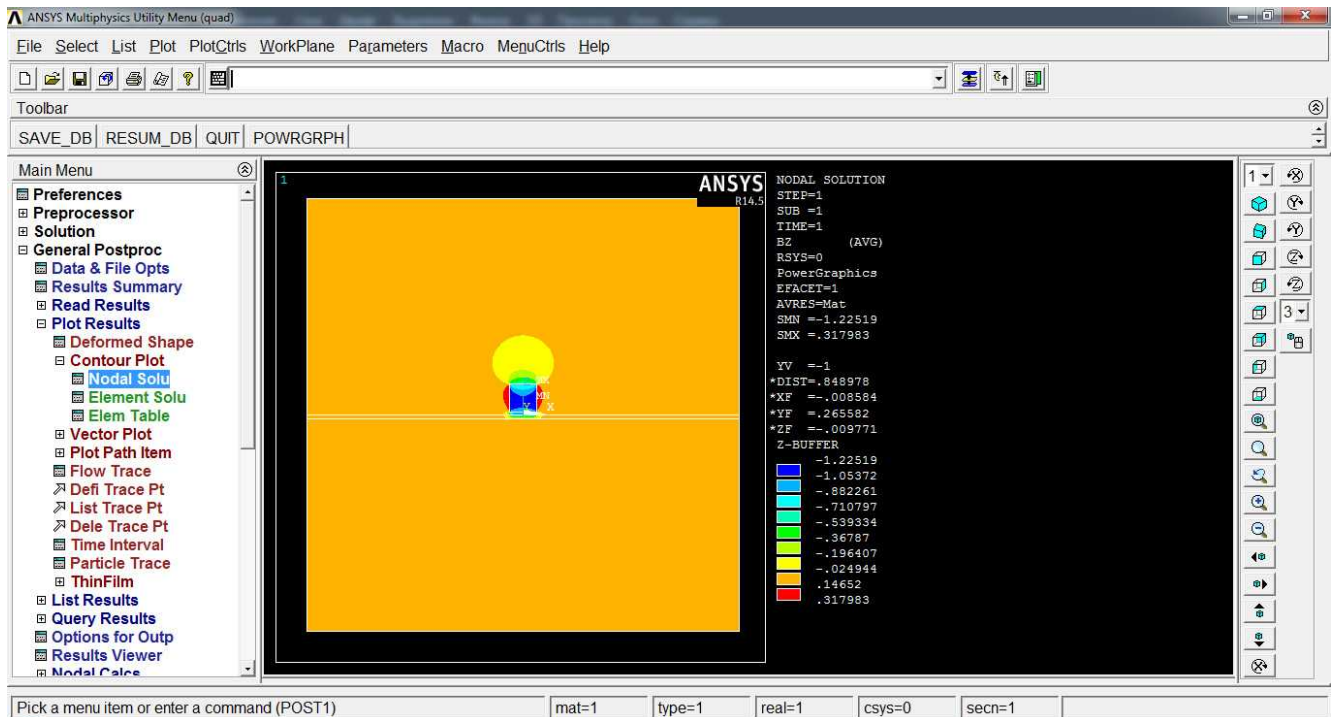
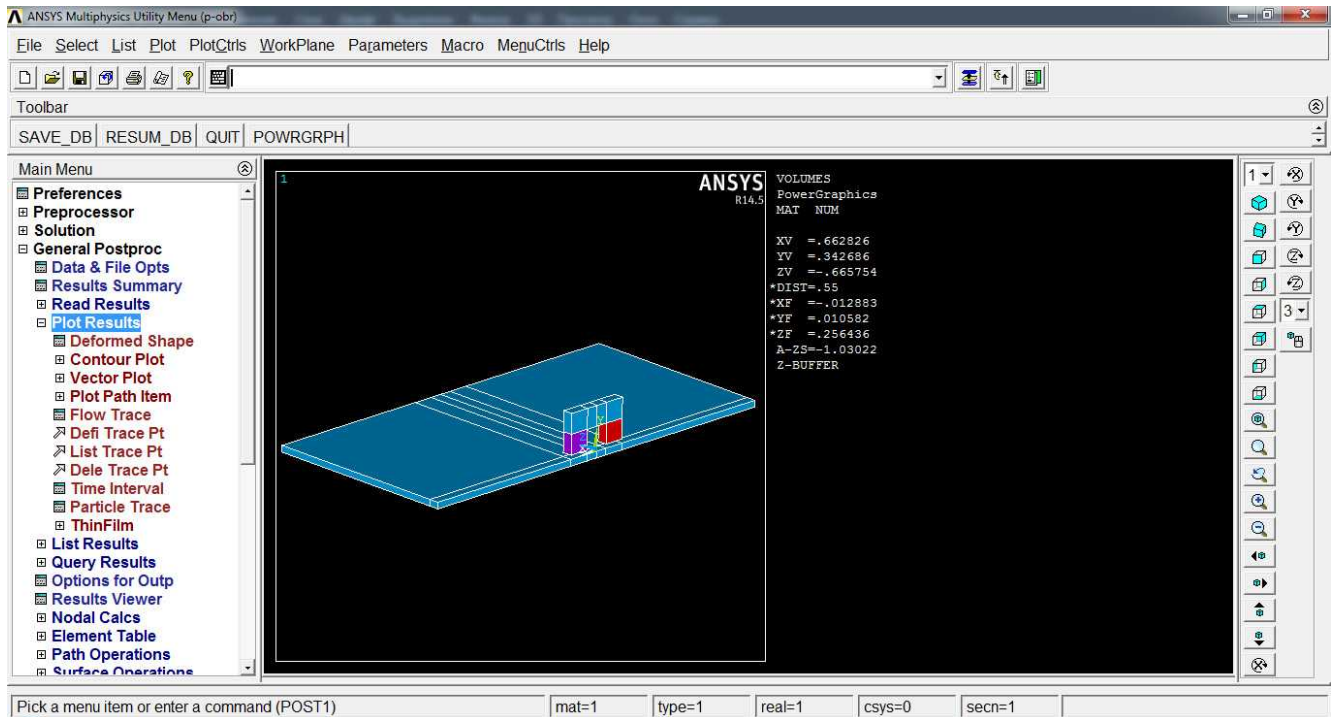
Таблица А.7 — Технические характеристики ультразвукового бесконтактного сканера-дефектоскопа «А2075 SoNet»

№	Наименование параметра	Значение
1	Производительность сканирования, м/мин	до 7
2	Минимальная глубина выявляемого дефекта, мм	1
3	Толщина контролируемой трубы, мм	от 6
4	Установленная скорость ультразвука, м/с	3020
5	Рабочая частота, МГц	0,5
6	Номинальное значение напряжения аккумуляторных блоков, В	12
7	Габаритные размеры, мм	407×655×407
8	Масса, кг не более	42

Проведённые испытания [88] выявили недостаточную чувствительность сканера к поперечным относительно оси трубы дефектам, а для окончательного определения типа и параметров выявленных дефектов необходимо использовать вспомогательные средства неразрушающего контроля. Также необходима доработка сканера до многоканального варианта для упрощения интерпретации результатов, однозначного определения координат дефектов по окружности и для устранения мёртвых зон при условии сканирования по одной линии. Сильное притяжение сканера к трубе делает затруднительным переезд сканером продольных и кольцевых швов без специальных технических средств, большая масса затрудняет использование сканера одним оператором.

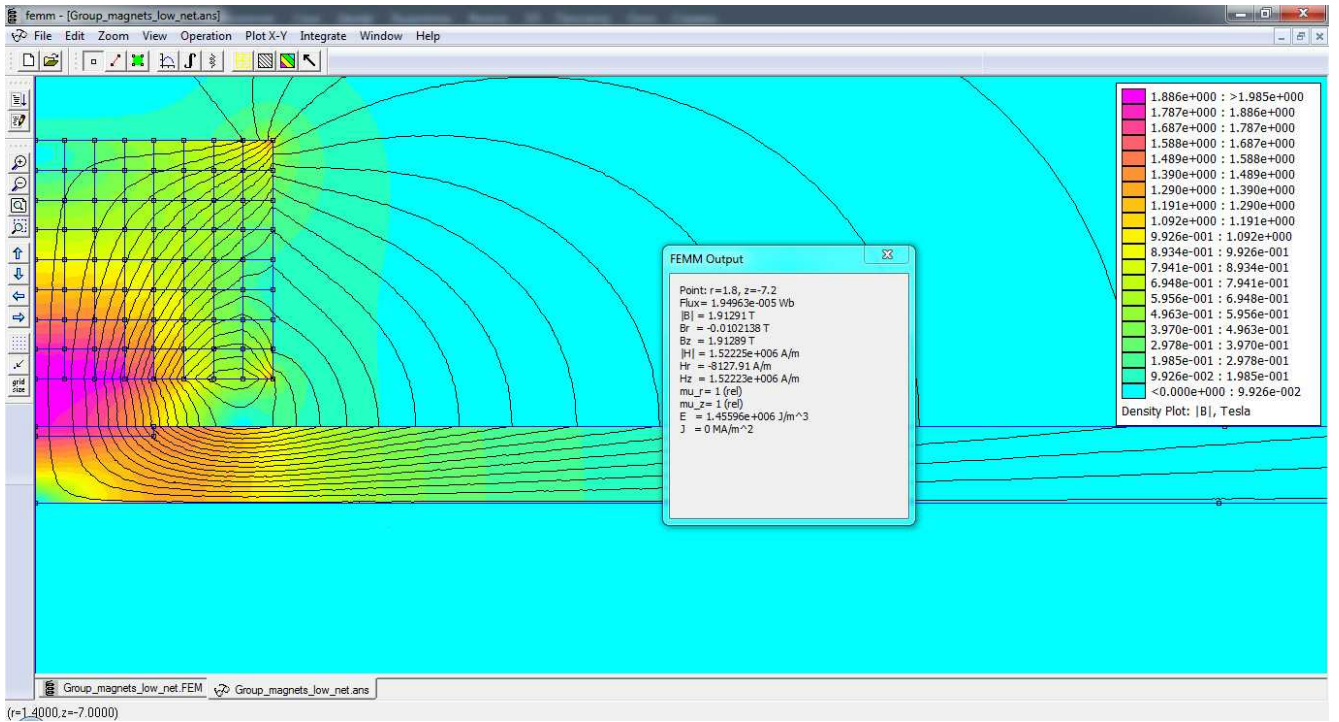
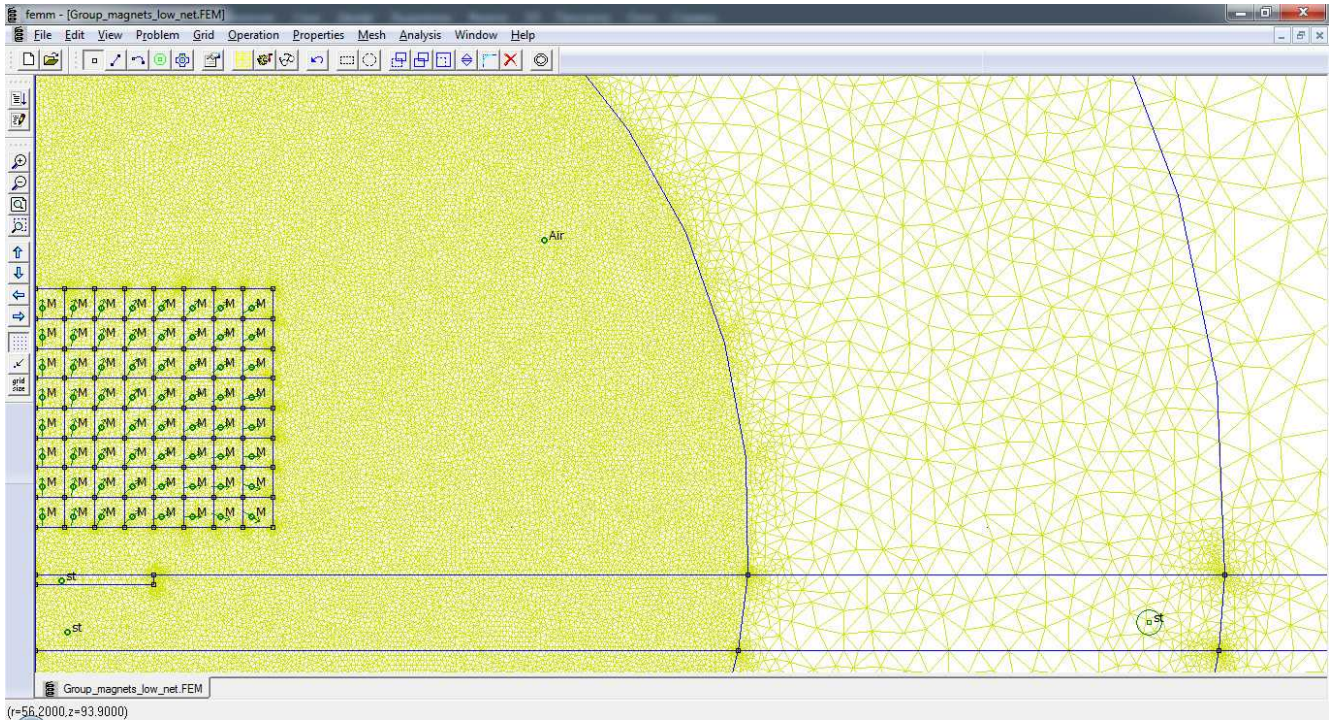
## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Скриншоты активных окон программы ANSYS



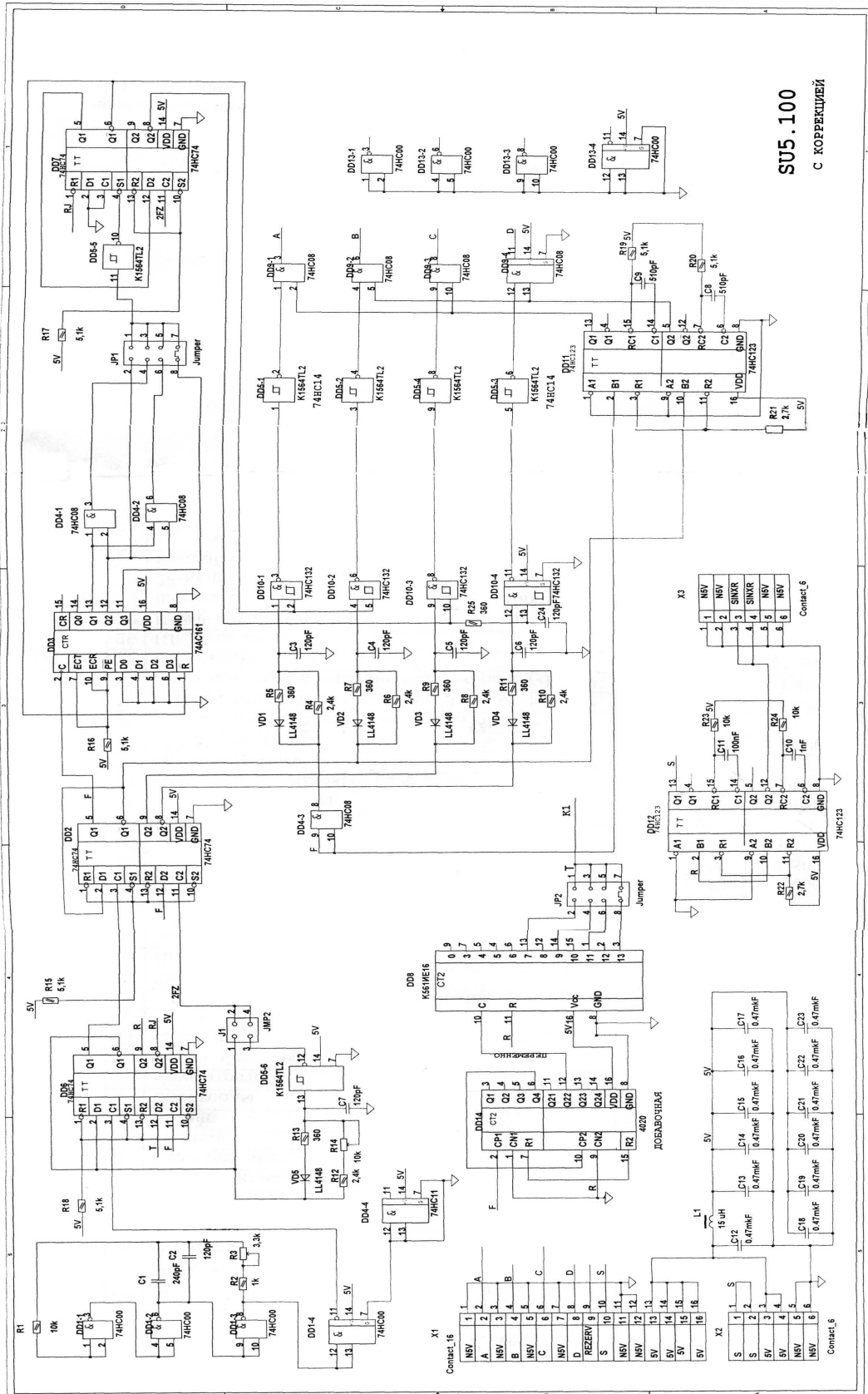
# ПРИЛОЖЕНИЕ В

## Скриншоты активных окон программы FEMM 4.2



# ПРИЛОЖЕНИЕ Г

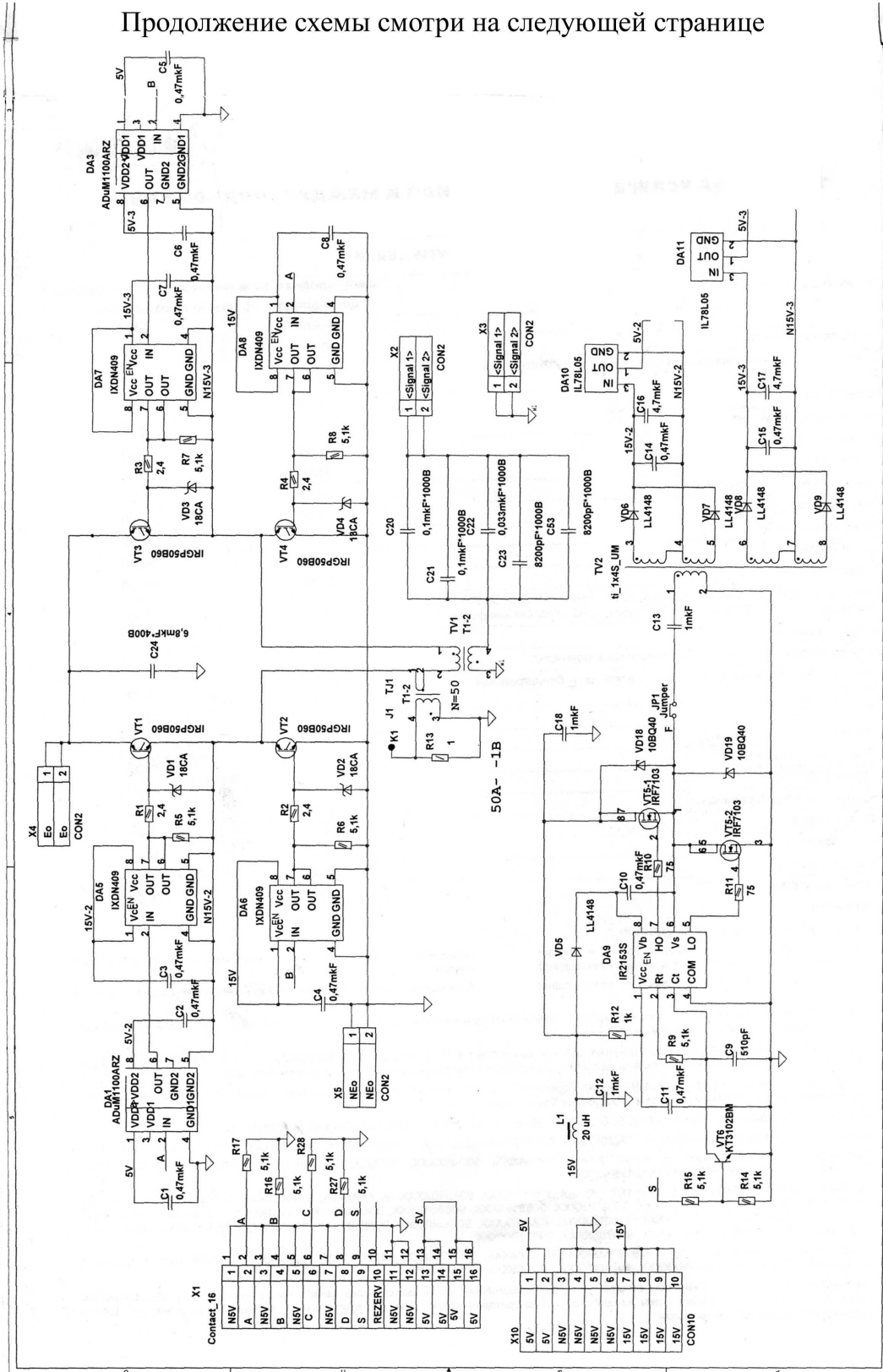
Электронная схема генератора зондирующих импульсов:  
блок формирования сигнала



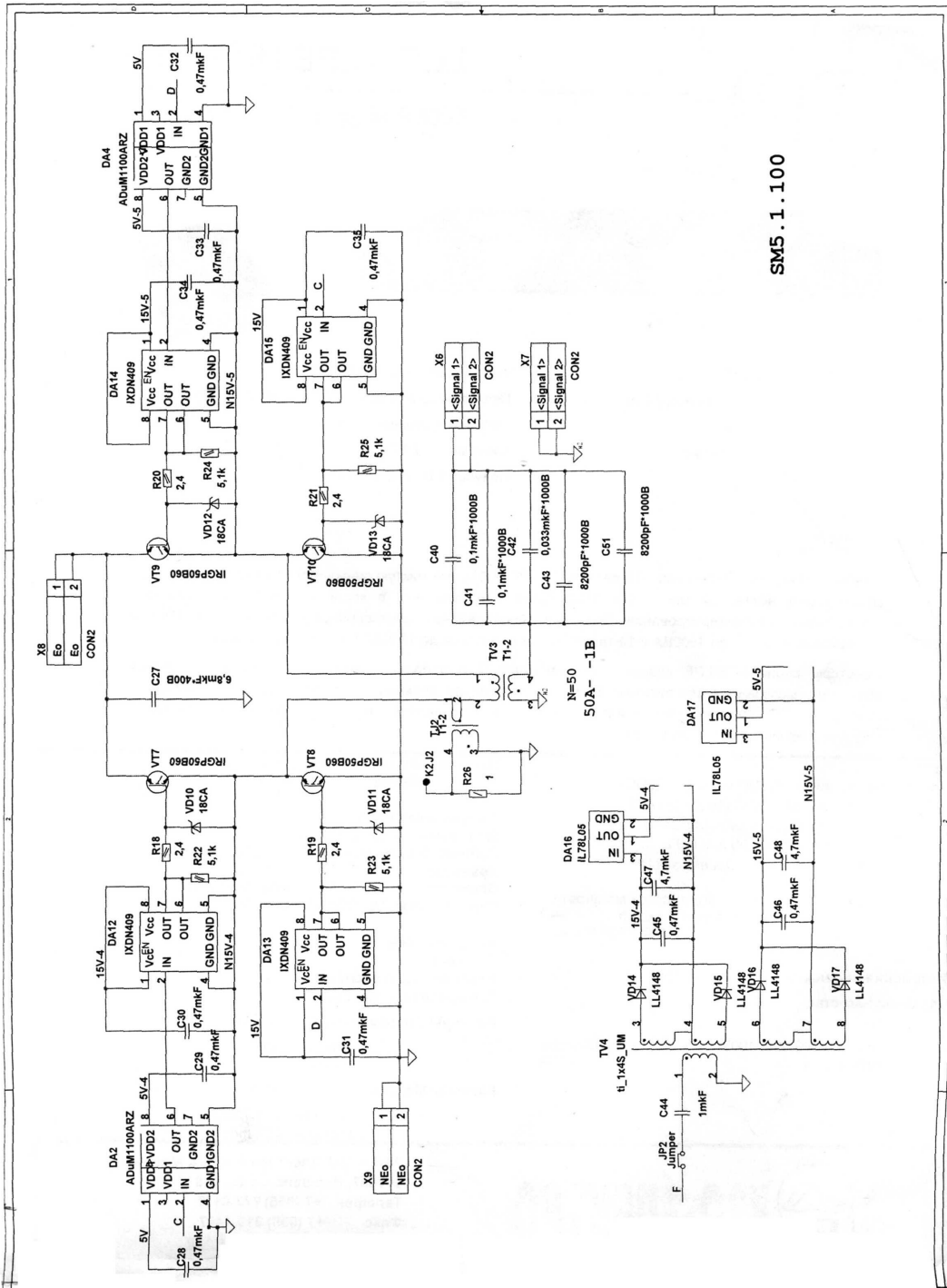
# ПРИЛОЖЕНИЕ Д

## Электронная схема генератора зондирующих импульсов: силовой блок

Продолжение схемы смотри на следующей странице





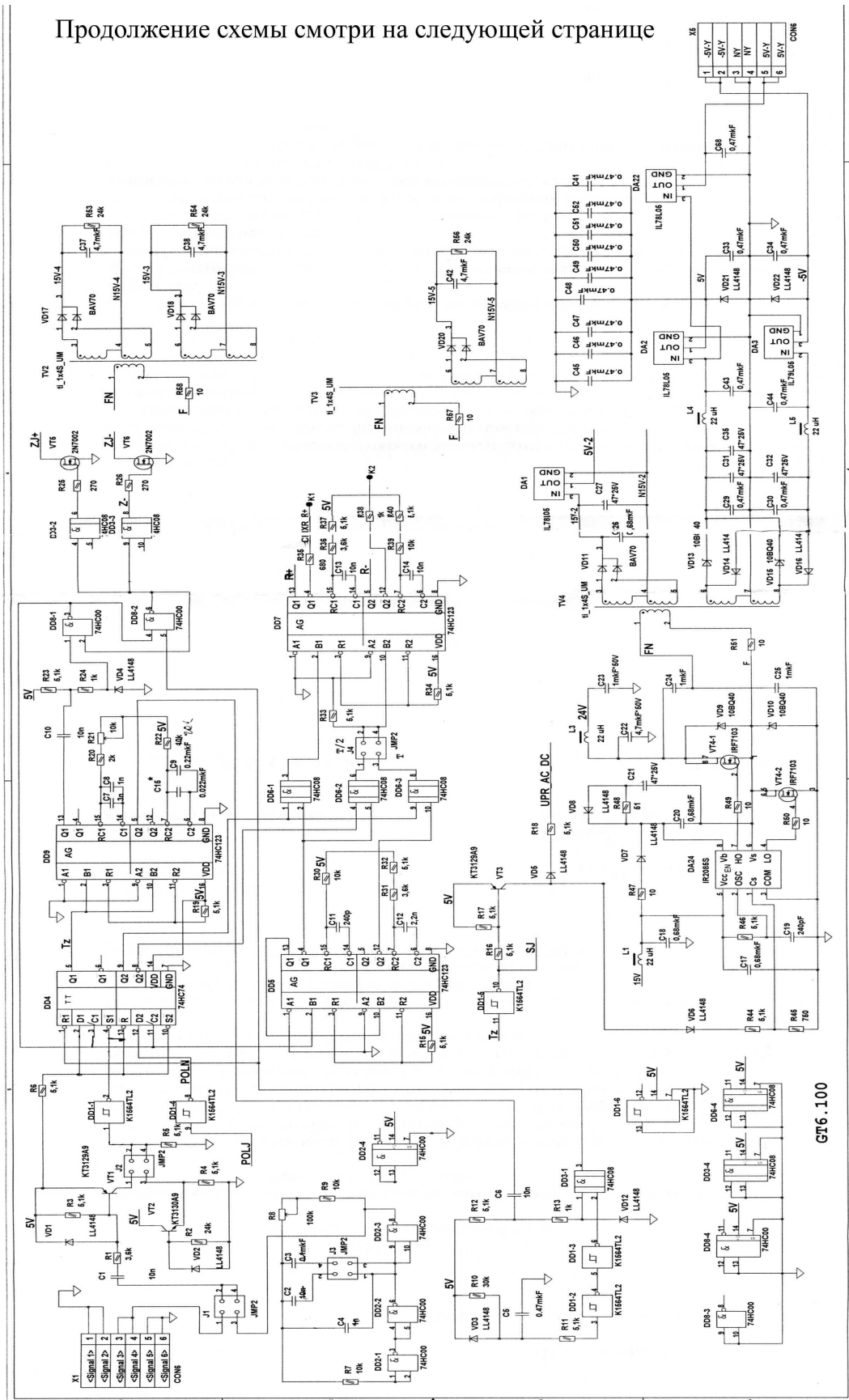


SMS 1.100

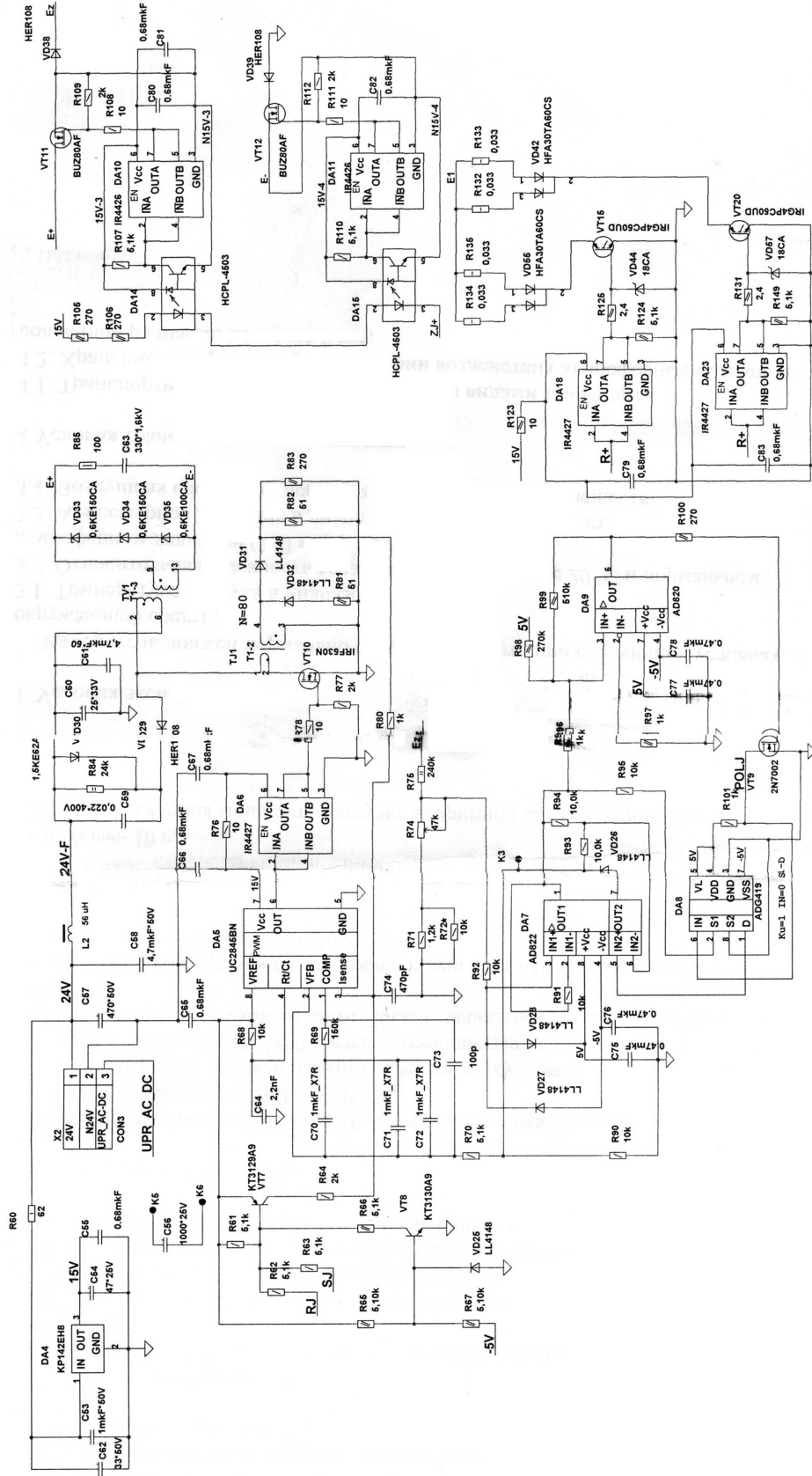
# ПРИЛОЖЕНИЕ Е

## Электронная схема генератора для импульсного подмагничивания

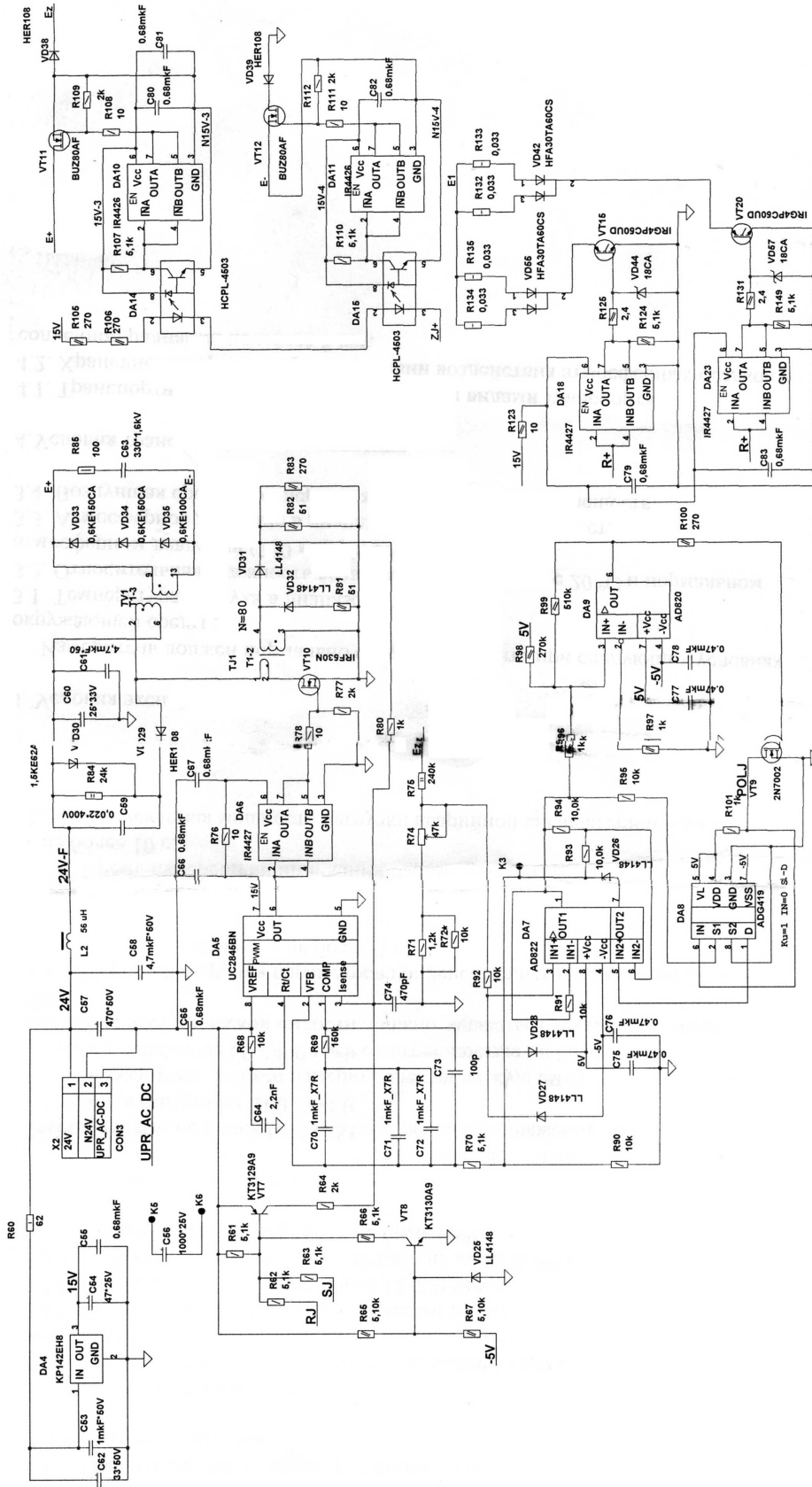
Продолжение схемы смотри на следующей странице



Продолжение схемы смотри на следующей странице



Продолжение схемы смотри на следующей странице



## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
АО «НПО «Интротест»  
Мироненко В.И.«14» мая 2016 г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт подтверждает внедрение результатов научно-исследовательской работы сотрудников Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН Гобова Ю.Л., Михайлова А.В., Смородинского Я.Г. «Намагничивающая система для ЭМА сканера-дефектоскопа».

Основные результаты работы: разработана новая намагничивающая система с нормальным по отношению к объекту контроля поляризующим полем. Результаты работы внедрены в АО «НПО «Интротест» в сканере-дефектоскопе «Автокон-ЭМА-МГТУ-2».

Разработанная намагничивающая система позволила увеличить чувствительность ЭМА сканера-дефектоскопа «Автокон-ЭМА-МГТУ-2», уменьшить его массогабаритные характеристики и эксплуатационные затраты на проведение неразрушающего контроля.



От АО «НПО «Интротест»  
Генеральный директор  
Мироненко В.И.

От ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН  
Отв. исполнитель  
Смородинский Я.Г.

