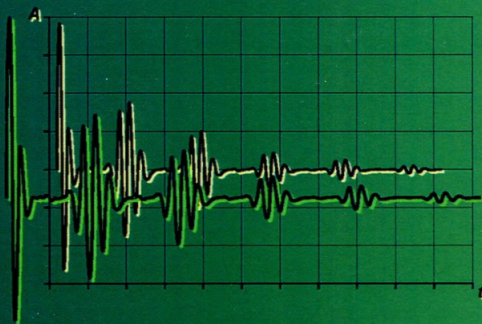


620.179.16

П 30

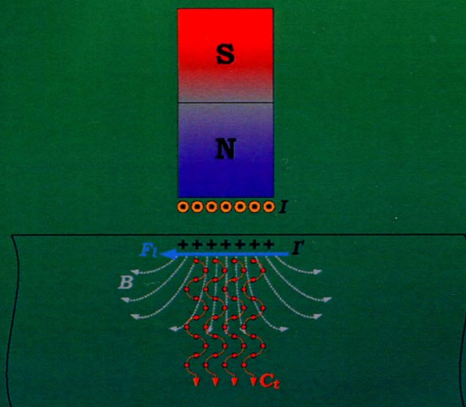


О.Н. Петрищев
Г.М. Сучков
С.Ю. Плеснецов

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНО - АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Часть 1.

Теоретические основы расчета и проектирования
электроакустических преобразователей электромагнитного типа



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

О. Н. Петрищев, Г. М. Сучков, С. Ю. Плесецов

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-
АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

**Часть 1, Теоретические основы расчета и проектирования
электроакустических преобразователей электромагнитного типа**

Монография

Харьков

2019

УДК 620.179.16: 620.179.17

ПЗ0

Рецензенты:

В. Ф. Болюх, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры общей электротехники
Национального технического университета
«Харьковский политехнический институт»

П. И. Стоев, д-р физ-мат наук, профессор, ведущий научный сотрудник
Национального научного центра «Украинский физико-технический институт»

Публикуется по решению Ученого совета Национального технического университета «ХПИ», протокол № 6 от 06 июля 2018 г.

У монографії викладені основи математичного моделювання перетворювачів електромагнітного типу в режимах збудження і реєстрації ультразвукових хвиль в стрижнях з електропровідних ферромагнетиків і металів неферромагнітної групи. Всі аналітичні конструкції містять в своїй основі фундаментальні положення механіки деформованого твердого тіла і технічної електродинаміки Отримано передавальні характеристики в режимах випромінювання і реєстрації ультразвукових хвиль прохідних і накладних перетворювачів електромагнітного типу Визначено хвильові характеристики перетворювачів.

Монографія призначена для спеціалістів з неруйнівного ультразвукового контролю, наукових робітників, аспірантів та студентів відповідних спеціальностей.

Петрищев О. Н.

ПЗ0 Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 1. Теоретические основы расчета и проектирования электроакустических преобразователей электромагнитного типа: монография / Петрищев О. Н., Сучков Г. М., Плеснецов С. Ю. Х.: Издательство «Оберіг», 2019 – 556 с. – На рус. яз.

В монографии изложены основы математического моделирования преобразователей электромагнитного типа в режимах возбуждения и регистрации ультразвуковых волн в стержнях из токопроводящих ферромагнетиков и металлов неферромагнитной группы. Все аналитические конструкции содержат в своей основе фундаментальные положения механики деформируемого твердого тела и технической электродинамики. Получены передаточные характеристики в режимах излучения и регистрации ультразвуковых волн проходных и накладных преобразователей электромагнитного типа. Определены волновые характеристики преобразователей.

Монография предназначена для специалистов по неразрушающему ультразвуковому контролю, научных работников, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

Ил. 190. Табл. 21. Библиогр. 208 наименований.

УДК 620.179.16: 620.179.17

ISBN 978-966-8689-34-5

© О. Н. Петрищев, Г. М. Сучков,
С. Ю. Плеснецов. 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Глава 1. ПРИНЦИПЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТИПА	9
1.1. Механизмы деформирования металлов переменным магнитным полем	9
<i>Прямой и обратный магнитострикционные эффекты (9). Феноменологическая теория магнитострикции и её линейное приближение (16). Определение магнитной проницаемости μ_{mn}^e через измеряемую в реальном эксперименте проницаемость μ_{mn}^s (18). Оценка числовых значений магнитострикционных констант m_1 и m_2 (20). Связность упругих и магнитных полей в объеме деформируемого ферромагнетика или ΔE-эффект (22). Расчет переменного магнитного поля в объеме ферромагнетика с конечными значениями магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости, созданного системой антипараллельных токов над поверхностью металла (23). Оценка размеров области существования переменного магнитного поля, которое создается в токопроводящем ферромагнетике системой антипараллельных токов (37). Сравнительная количественная оценка вихретокового и магнитострикционного механизмов образования деформаций в металлических ферромагнетиках (37).</i>	
1.2. Конструкции, обобщенные структурные схемы и передаточные характеристики преобразователей электромагнитного типа	43
<i>Типовые конструкции преобразователей электромагнитного типа (47). Первичные преобразователи механических величин (55). Необратимый преобразователь в режиме возбуждения крутильных волн (63). Алгоритм преобразования сигналов при электромагнитном способе возбуждения ультразвуковых волн в металлах (65). Обобщенная структурная схема преобразователя электромагнитного типа в режиме возбуждения ультразвуковых волн (67). Определение векторной передаточной функции в режиме излучения ультразвуковых волн (68). Определение импульсной характеристики излучающего преобразователя электромагнитного типа (69). Алгоритм преобразования сигналов в режиме регистрации ультразвуковых волн с помощью преобразователя электромагнитного типа (71). Обобщенная структурная схема преобразователя - приемника электромагнитного типа (73).</i>	
1.3. Схема вычислительных процедур при построении математической модели преобразователя электромагнитного типа в режиме возбуждения ультразвуковых волн в металле	75
<i>Общая формулировка граничной задачи динамической магнитоупругости (77). Концепция внутреннего магнитного поля и метод полигармонических разложений как средство решения нелинейной задачи динамической магнитоупругости (78). Модельное исследование феномена связности упругих и магнитных полей в объеме деформируемого ферромагнетика и количественная оценка уровней проявления ΔE-эффекта (85). Метод последовательных приближений как инструмент для решения линейной граничной задачи динамической магнитоупругости (89)</i>	
1.4. Принципы построения математических моделей ультразвуковых преобразователей электромагнитного типа в режиме приема (регистрации) упругих колебаний	94
<i>Алгоритмы преобразования сигналов при регистрации упругих волн в ферромаг-</i>	

нетиках и в металлах ферромагнитной группы (98). Теорема о наведенном магнитном потоке для механически деформируемых в присутствии постоянного магнитного поля металлов ферромагнитной группы (100). Теорема о наведенном магнитном потоке для металлов ферромагнитной группы (103). Модельное исследование динамической намагниченности в поляризованном продольным магнитным полем ферромагнитном стержне (107). Коэффициент динамического саморазмагничивания (111). Феномен динамического саморазмагничивания (113).

1.5. Резюме..... 116

Глава 2. НОРМАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ В ИЗОТРОПНЫХ СТЕРЖНЯХ КРУГОВОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ..... 119

2.1. Волноводное распространение упругих колебаний и условия существования гармонических волн в изотропных стержнях кругового поперечного сечения..... 119

Учет радиальных смещений при описании распространения продольных волн (модельный пример) (120). Частотно-зависимое изменение энергоемкости радиального компонента в продольной волне (123). Частотная дисперсия скорости распространения гармонической продольной волны (124). Фазовая и групповая скорости (125). Определение нормальной волны (125). Скалярный Φ и векторный $\vec{\Psi}$ потенциалы поля смещений материальных частиц упруго деформируемых твердых тел и уравнения Гельмгольца (127). Общие решения уравнения Гельмгольца для полого изотропного стержня кругового поперечного сечения (129). Следствия условия $\text{div } \vec{\Psi} = 0$ (131). Общие определения компонентов вектора смещения материальных частиц, компонентов тензора упругих деформаций и механических напряжений на площадках, перпендикулярных радиальной оси ρ (132). Граничные условия на свободных боковых поверхностях бесконечного стержня и условия существования гармонических упругих волн в полом изотропном стержне кругового поперечного сечения (133). Условия существования осесимметричных гармонических волн в полых изотропных стержнях кругового поперечного сечения (134).

2.2. Осесимметричные сдвиговые (крутильные) волны в изотропных стержнях кругового поперечного сечения..... 137

Формулы для расчета окружных смещений $u_{\theta}^{(\pm)}(\rho)$ во фронте крутильной волны (137). Графики изменения окружных смещений $u_{\theta}^{(\pm)}(\rho)$ по радиусу стержня для различных по номеру нормальных крутильных волн (140). Частотный спектр волновых чисел крутильных волн (141). Фазовые и групповые скорости осесимметричных крутильных волн (143).

2.3. Продольные осесимметричные волны в полых и сплошных стержнях кругового поперечного сечения..... 144

Комбинационные соотношения первого рода и описание компонентов вектора смещения материальных частиц полого стержня (148). Формулы для расчета компонентов вектора смещений материальных частиц в продольной волне в сплошном стержне (149). Дисперсионное уравнение Похгаммера-Кри или условие существования гармонической продольной волны в сплошном стержне кругового поперечного сечения (149). Частотный спектр действительных и чисто мнимых волновых чисел продольных нормальных волн в сплошном стержне (150). Методика определения координат точек выхода из плоскости $\Omega = 0$ ветвей комплексных волновых чисел продольных нормальных волн (151). Числовые значения координат точек выхода из плоскости $\Omega = 0$ первых шести комплексных ветвей для различных значений коэффициента Пуассона (155). Точки входа комплексных ветвей частотного спектра нормальных волн в

плоскость $\text{Re } \mathbf{G} = 0$ (156). Феномен «обратной» волны (159). Фазовые и групповые скорости первых двадцати нормальных продольных волн ($\nu = 0, 3$) в сплошном стержне (161). Частоты загираания второй нормальной продольной волны в сплошном стержне (163). Оценка верхней граничной частоты частотного диапазона, в котором применима гипотеза плоских поперечных сечений (164). Аппроксимация числовых значений фазовой и групповой скорости первой продольной волны в сплошном стержне (166). Кинематические характеристики первой продольной нормальной волны в области высоких частот. Поверхностная волна Рэлея (167). Частоты загираания нормальных волн в полом стержне кругового поперечного сечения (170). Условия существования продольных осесимметричных волн в полом стержне на различных частотах (173). Частотные спектры действительных и чисто мнимых волновых чисел осесимметричных продольных волн в полых изотропных стержнях кругового поперечного сечения (175). Кинематические характеристики первой и второй нормальной продольной волны в полом стержне (181). Трансформация первой и второй нормальной волны в поверхностные волны Рэлея (184).

2.4. Неосесимметричные гармонические волны в изотропных стержнях кругового поперечного сечения.....186

Комбинационные соотношения первого рода для неосесимметричных нормальных волн (186). Формулы для расчета компонентов вектора смещения в нормальной волне n -го порядка симметрии (189). Формулы для расчета компонентов вектора смещения в нормальных неосесимметричных волнах в сплошном стержне кругового поперечного сечения (191). Частоты загираания нормальных неосесимметричных волн в сплошных стержнях кругового поперечного сечения (192). О правомерности названия неосесимметричных нормальных волн изгибными волнами (193). Условия существования неосесимметричных нормальных волн в сплошных стержнях в различных частотных диапазонах (195). Частотные спектры волновых чисел неосесимметричных волн в сплошном стержне кругового поперечного сечения (196). Трансформация первых мод различных по порядку симметрии n семейств неосесимметричных нормальных волн в сплошном стержне в поверхностные волны Рэлея (200). Кинематические характеристики первых мод неосесимметричных нормальных волн в сплошных стержнях кругового поперечного сечения (201). Неосесимметричные поверхностные волны Рэлея (208). Кинематические характеристики второй и последующих за ней по номеру мод нормальных неосесимметричных волн различных порядков симметрии в сплошных стержнях (202). Частоты загираания неосесимметричных нормальных волн в полых изотропных стержнях кругового поперечного сечения (214). Условия существования гармонических неосесимметричных упругих волн в полых стержнях в различных частотных диапазонах (219). Частотные спектры волновых чисел изгибных ($n = 1$) неосесимметричных нормальных волн в полых стержнях (224). Частотные спектры волновых чисел неосесимметричных ($n = 4$) нормальных волн в полых стержнях кругового поперечного сечения (230).

2.5. Резюме.....232

Глава 3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТИПА В РЕЖИМАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПРИЕМА ДЛИННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН.....237

3.1. Моделирование процесса возбуждения ультразвуковых волн в области низких частот.....237

Одноосное сжатие-растяжение продольно поляризованного ферромагнитного стержня в переменном магнитном поле катушки (237). Уравнение продольных колебаний намагниченного ферромагнитного стержня (241). Количественная оценка

ΔE -эффекта (244). Решение неоднородного уравнения продольных колебаний с помощью интегрального преобразования Фурье по аксиальной координате (245). Модельный пример и доказательство достоверности полученного решения (250). Волновая характеристика электроакустического преобразователя (252). Скручивание стержней кругового поперечного сечения низкочастотными внешними нагрузками (255). Уравнение установившихся гармонических крутильных колебаний и его решение для бесконечного стержня (256). Конструкция преобразователя электромагнитного типа для возбуждения крутильных волн в полых ферромагнитных стержнях кругового поперечного сечения (258). Оценка передаточной характеристики преобразователя электромагнитного типа и доказательство достоверности расчетных соотношений (259). Вывод уравнения крутильных колебаний в намагниченном ферромагнитном стержне кругового поперечного сечения (260). Количественная оценка ΔE -эффекта при скручивании (262). Уравнение поперечного изгиба и частотная дисперсия скорости распространения гармонических изгибных волн (264). Оценка диапазона частот, в пределах которого наблюдается удовлетворительное совпадение теории поперечного изгиба и теории нормальных неосесимметричных волн (265). Решение уравнения гармонических поперечных колебаний бесконечно длинного стержня, расположенного на вязкоупругом основании, с помощью интегрального преобразования Фурье (266). Оценка линейной плотности внешних поперечных нагрузок для произвольного (в смысле распределения в пространстве) переменного магнитного поля (270). Возбуждение волн поперечного изгиба магнитным полем катушки (271) Вывод уравнения поперечных изгибных колебаний намагниченного ферромагнитного стержня (272). Количественная оценка ΔE -эффекта при изгибе ферромагнитных стержней (275).

3.2. Методы расчета передаточных характеристик проходных катушечных преобразователей в режиме возбуждения ультразвуковых волн.....276

Определение термина «передаточные характеристики» преобразователя (276). Общие определения векторной импульсной и импульсной переходной характеристики и алгоритм определения импульсного отклика электроакустического преобразователя (277). Проходной катушечный преобразователь электромагнитного типа (278). Расчет амплитудных значений продольных недиспергирующих волн, которые возбуждаются переменным магнитным полем катушки в сплошном ферромагнитном стержне кругового поперечного сечения (284). Волновая характеристика источника переменного магнитного поля (287). Расчет переменного магнитного поля в токопроводящем, предварительно намагниченном, ферромагнитном стержне кругового поперечного сечения (288). Частотная характеристика катушки в режиме излучения продольных недиспергирующих волн (289). Частотная характеристика преобразователя с двумя одинаковыми, но встречно включенными, катушками (291). Методика расчета передаточных характеристик катушки в режиме возбуждения недиспергирующих крутильных волн в поляризованном окружающим магнитным полем ферромагнитном стержне кругового поперечного сечения (292). Волновая характеристика полого, токопроводящего ферромагнитного стержня кругового поперечного сечения с медным центральным проводником (296). Излучающий крутильные волны преобразователь с двумя встречно включенными одинаковыми катушками (299). Расчет передаточных характеристик катушечного преобразователя в режиме возбуждения ультразвуковых волн поперечного изгиба в ферромагнитных стержнях кругового поперечного сечения (301). Количественная оценка ΔE -эффекта для напряженно-деформированного состояния поперечного изгиба (306).

3.3. Математические модели преобразователей электромагнитного типа с ферромагнитными сердечниками в режиме возбуждения

ультразвуковых волн в стержнях.....310

Особенности расчета характеристик преобразователей электромагнитного типа с ферромагнитными сердечниками (310). Необратимый ультразвуковой преобразователь для возбуждения крутильных волн в полых ферромагнитных стержнях кругового поперечного сечения (312). Расчет распределения постоянного магнитного поля кольцевого магнита с аксиальной поляризацией в объеме полого ферромагнитного стержня (314). Волновая характеристика необратимого электроакустического преобразователя с аксиальной поляризацией кольцевого магнита (319). Импульсная характеристика необратимого преобразователя (321). Исследование откликов необратимого преобразователя с аксиальной поляризацией кольцевого магнита на различные по форме импульсные воздействия на электрическом входе (325). Расчет волновой характеристики необратимого преобразователя с радиальной поляризацией постоянно-го кольцевого магнита (330). Магнитная головка с кольцевым ферромагнитным сердечником - обратимый преобразователь электромагнитного типа (335). Расчет распределения магнитного поля кольцевой магнитной головки в пустом пространстве (336). Расчет магнитного поля головки с кольцевым сердечником в объеме ферромагнитного, токопроводящего стержня кругового поперечного сечения (344). Расчет частотной характеристики магнитной головки в режиме возбуждения недиспергирующих продольных волн в ферромагнитном стержне (350).

3.4. Расчет частотных характеристик преобразователей электромагнитного типа в режиме регистрации недиспергирующих волн в ферромагнитных стержнях.....359

Расчет частотной характеристики проходного катушечного преобразователя в режиме регистрации плоских недиспергирующих продольных волн в стержнях кругового поперечного сечения (359). Расчет частотной характеристики накладного катушечного преобразователя в режиме регистрации продольных волн в стержне кругового поперечного сечения (365). Математическая модель магнитной головки с кольцевым сердечником в режиме приема плоских продольных волн в стержне кругового поперечного сечения (376). Математическая модель динамического обратного магнито-стрикционного эффекта (эффекта Виллари) при деформировании полого стержня недиспергирующими крутильными волнами (379). Динамическое саморазмагничивание деформируемого крутильными волнами полого стержня (387).

3.5. Резюме.....390**Глава 4. ВОЗБУЖДЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ИЗОТРОПНЫХ СТЕРЖНЯХ КРУГОВОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОБЪЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК.....395****4.1. Возбуждение системой объемных и поверхностных нагрузок осесимметричных ультразвуковых волн в полых и сплошных стержнях кругового поперечного сечения.....395**

Постановка задачи и формулировка основных соотношений (395). Решение граничной задачи о возбуждении осесимметричных крутильных волн системой объемных и поверхностных нагрузок (397). Особенности выполнения обратного интегрального преобразования Фурье (399). Амплитудные множители n -ой нормальной крутильной волны (406). Амплитудный множитель нулевой (недиспергирующей) крутильной волны и доказательство достоверности полученного решения (406). Решение граничной задачи о возбуждении продольных осесимметричных волн в сплошном стержне кругового

го поперечного сечения (407). Амплитудный множитель первой нормальной продольной волны, которая распространяется вправо от области приложения внешних сил (412). Доказательство достоверности решения (4.1.80) (415). Амплитудный множитель второй нормальной продольной волны (417). Решение граничной задачи о возбуждении продольных осесимметричных волн в полом стержне кругового поперечного сечения системой объемных и поверхностных нагрузок (418). Комбинационные соотношения второго рода и амплитудный множитель n -ой нормальной продольной волны в полом стержне кругового поперечного сечения (422). Доказательство достоверности полученного решения (423).

4.2. Возбуждение диспергирующих осесимметричных ультразвуковых волн в металлических стержнях преобразователями электромагнитного типа.....425

Расчет переменного магнитного поля кольцевой катушки в объеме токопроводящего ферромагнитного стержня (426). Влияние магнитной проницаемости ферромагнетика на характер пространственного распределения статического магнитного поля катушки (433). Влияние частоты смены знака на характер изменения магнитного поля катушки в объеме и на поверхности токопроводящего ферромагнитного стержня (434). Распределение в объеме ферромагнитного стержня окружного компонента вектора плотности вихревого тока проводимости (436). Расчет поля сил Джоуля (магнотриксционных сил) (438). Сравнение числовых значений сил Джоуля и сил Лоренца (442). Расчет амплитудных множителей нормальных волн, которые возбуждаются в ферромагнитном стержне переменным магнитным полем катушки (443). Волновая характеристика преобразователя электромагнитного типа с катушечным индуктором в режиме возбуждения диспергирующих продольных волн (448). Волновые коэффициенты нормальных продольных волн двух типов (450). Кинематические характеристики волнового поля шумов акустической эмиссии (452). Функция Грина осесимметричной составляющей волнового поля точечного источника шумов акустической эмиссии (458). Амплитудный множитель n -ой нормальной волны в волновом поле, которое формируется конечной по размерам областью точечных источников шумов акустической эмиссии (460).

4.3. Исследование передаточных характеристик ультразвукового тракта с электромагнитным возбуждением и регистрацией продольных ультразвуковых волн..... 461

Определение ультразвукового тракта (461). Коэффициент передачи ультразвукового тракта (463). Расчет магнитного потока, который пронизывает электрический контур приемника переменного магнитного поля в составе преобразователя регистрирующего ультразвуковые волны (464). Определение компонентов вектора напряженности внутреннего магнитного поля (467). Определение динамической намагниченности и вычисление потока магнитной индукции через электрический контур приемника переменного магнитного поля (471). Определение электрического потенциала на электрическом выходе ультразвукового тракта (472). Частотная характеристика проходного катушечного преобразователя в режиме возбуждения диспергирующих продольных волн в ферромагнитном стержне (474). Комплексная частотная характеристика ультразвукового тракта (476). Особенности формообразования импульсных сигналов на электрическом выходе ультразвукового тракта (478). Дисперсионные искажения формы импульсного отклика ультразвукового тракта (482). Зависимость скорости распространения ультразвукового импульса от пройденного им расстояния (484). Устойчивость импульсного отклика ультразвукового тракта к дисперсионным искажениям (485). Отклик ультразвукового тракта на электрическое воздействие в форме биполярного прямоугольного импульса (дипульса) (486). Отклик ультразвукового

тракта на электрическое воздействие в форме радиопульса (отрезка синусоиды) (490). О невозможности экспериментального определения групповой скорости нормальной волны (494). Расчет магнитного поля соленоида - источника постоянного поля подмагничивания (495). Оценка верхнего предела в интеграле обратного преобразования Фурье (499). Исследование характера пространственного распределения постоянного магнитного поля соленоида в объеме и на поверхности ферромагнитного стержня (501).

4.4. Исследование передаточных характеристик ультразвукового тракта с вихрековым возбуждением и регистрацией недиспергирующих крутильных волн.....504

Математическое моделирование процесса регистрации крутильных волн в тонкостенной трубке из неферромагнитного металла (506). Альтернативное доказательство теоремы о наведенном магнитном потоке (597). Оценки вихревого тока проводимости, который возникает в металлической трубке при её деформировании крутильными волнами (510). Расчет постоянного поля подмагничивания, которое создается катушками Гельмгольца (511). Оценка верхнего предела в интеграле обратного преобразования Фурье (516). Расчет магнитного поля, которое создается встречно включенными катушками Гельмгольца (518). Расчет параметров электромагнитного поля в стенке металлической трубки, которое создается первичным вихревым током $J_p^*(\rho, z)$ (521). Расчет вихревых токов в стенке металлической трубки (522). Критерий выбора конструкции приемника переменного магнитного поля в составе преобразователя регистрирующего крутильные волны (524). Магнитная головка с кольцевым ферромагнитным сердечником - приемник переменного магнитного поля, которое формируется в тонкостенной металлической трубке крутильными волнами (525). Расчет интегрального Фурье-образа окружного компонента вектора напряженности $H_{\phi}^{pp}(\rho, \phi, k_s)$ магнитного поля магнитной головки (526). Определение интегрального образа окружного компонента вектора напряженности магнитного поля магнитной головки в нулевом приближении (531). Оценка (в нулевом приближении) величины электродвижущей силы $U_s^{(0)}(\omega)$ на электрическом выходе приемника крутильных волн (532). Описание конструкции преобразователя электромагнитного типа для регистрации крутильных волн в тонкостенной трубке из металла неферромагнитной группы (535). О возможности применения магнитной головки с кольцевым ферромагнитным сердечником в качестве излучателя недиспергирующих крутильных волн (536). Определение вихревого электрического поля в стенке металлической трубки (538). Оценки числовых значений компонентов вектора напряженности вихревого электрического поля в объеме тонкой стенки металлической трубки (540). Абсолютная чувствительность и частотная характеристика магнитной головки в режиме возбуждения крутильных волн в продольном поле подмагничивания (542). Рекомендации по повышению чувствительности излучателя крутильных волн, в конструкции которого используются магнитные головки в качестве источников переменного магнитного поля (544).

4.5. Резюме.....545