

РОСЖЕЛДОР

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВПО РГУПС)**

В.Ф. Криворудченко, Л.Г. Северинова

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям

Ростов-на-Дону

2015

УДК 629.4(07) + 06

Рецензент – кандидат технических наук, доцент А.С. Шапшал

Криворудченко, В.Ф.

Техническая диагностика подвижного состава: учебно-методическое пособие к практическим занятиям / В.Ф. Криворудченко, Л.Г. Северинова; ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – 32 с.

В учебно-методическом пособии изложены примеры алгоритмов диагностирования узлов подвижного состава, в кратком изложении методика расчета статистических показателей надежности, расчет параметров магнитных и акустических полей и аппаратуры неразрушающего контроля. Приведены примеры расчета магнитной индукции, напряженности, токов при магнитопорошковом методе контроля, параметров пьезоэлектрических преобразователей, используемых при ультразвуковом контроле деталей подвижного состава.

Пособие предназначено для студентов 4-го курса очной и заочной форм обучения специальности 190300 «Подвижной состав железных дорог», изучающих дисциплину «Техническая диагностика подвижного состава».

Одобрено кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство».

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Разработка алгоритмов диагностирования деталей (узлов) вагонов и локомотивов	4
1.1 Алгоритм оценки технического состояния деталей подвижного состава с использованием средств технического диагностирования (СТД)	4
1.2 Алгоритм диагностирования буксовых узлов подвижного состава на ходу поезда	6
1.3 Алгоритм диагностирования подшипников виброакустическим методом	7
1.4 Алгоритмы диагностирования в области организации и технологии производства	8
2 Расчет статистических показателей надежности подвижного состава	11
2.1 Общие понятия о надежности	11
2.2 Методика статистической обработки информации	11
3 Расчет параметров неразрушающего контроля деталей подвижного состава и аппаратуры	13
3.1 Определение способа магнитопорошкового метода контроля (МПК)	13
3.2 Расчет параметров магнитных полей (МП) при магнитопорошковом методе контроля деталей подвижного состава	17
3.3 Расчет параметров акустических пьезоэлектрических преобразователей	28
Библиографический список	31

1 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ (УЗЛОВ) ВАГОНОВ И ЛОКОМОТИВОВ

1.1 Алгоритм оценки технического состояния деталей подвижного состава с использованием средств технического диагностирования (СТД)

Для оценки технического состояния объектов контроля используют количественные и качественные диагностические признаки (параметры), характеризующие соответствие объекта требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. К количественным относятся признаки, для которых важно их численное значение (ползун, бракуемый по численному значению его глубины). К качественным относят признаки, для которых имеет значение сам факт их наличия независимо от размеров (трещина в оси, диске колеса и др.).

Пороговое значение диагностического признака – это численное значение диагностического признака, являющееся границей классов или видов технического состояния, например, работоспособного и неработоспособного.

Чувствительность метода оценки технического состояния, а также чувствительность аппаратуры диагностирования, представляют наименьшее численное значение диагностического признака, которое может быть выявлено и зарегистрировано с помощью данного метода и данной аппаратуры.

В соответствии с ГОСТ 20911 под системой технического диагностирования понимают совокупность технических средств диагностирования, объектов диагностирования, а также исполнителей, осуществляющих диагностирование по правилам, установленным нормативно-технической документацией.

Технические средства диагностирования – это *информационно-измерительные системы*, включающие:

- 1) аппаратные средства;
- 2) программные средства;
- 3) эксплуатационную и ремонтную техническую документацию.

В общем случае *аппаратные средства* включают:

– измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования первичных информативных признаков о техническом состоянии объектов диагностирования в электрические сигналы;

– блок или блоки обработки электрических сигналов от преобразователя в форму, удобную для сравнения с заданными значениями контролируемых параметров;

– индикатор, сигнализатор или регистратор результатов диагностирования.

Используют обычно следующие *виды индикации*:

- световую (контрольные лампочки, светодиоды и т. д.);
- звуковую;
- цифровую на экране;
- стрелочными приборами;
- в виде кривых линий на экране.

Регистрация результатов диагностирования осуществляется в виде:

- записи на бумажной ленте;
- в памяти ЭВМ с выводом на дисплей или на печать.

Методы и устройства технического диагностирования по характеру получаемых от объекта сигналов включают следующие основные группы:

- с детерминированным значением диагностического признака, которое измеряют с определенной погрешностью, например, диаметр колеса или толщину гребня колеса;
- с вероятностным распределением численных значений диагностического признака.

Во втором случае различают объекты диагностики, у которых можно произвести измерение:

- единичного значения вероятностного признака;
- параметров реализации случайного процесса в течение заданного интервала времени.

Наиболее часто используют методы измерения амплитуды или частоты (периодичности) сигналов.

Алгоритм диагностирования – совокупность предписаний и последовательность операций по проведению диагностирования.

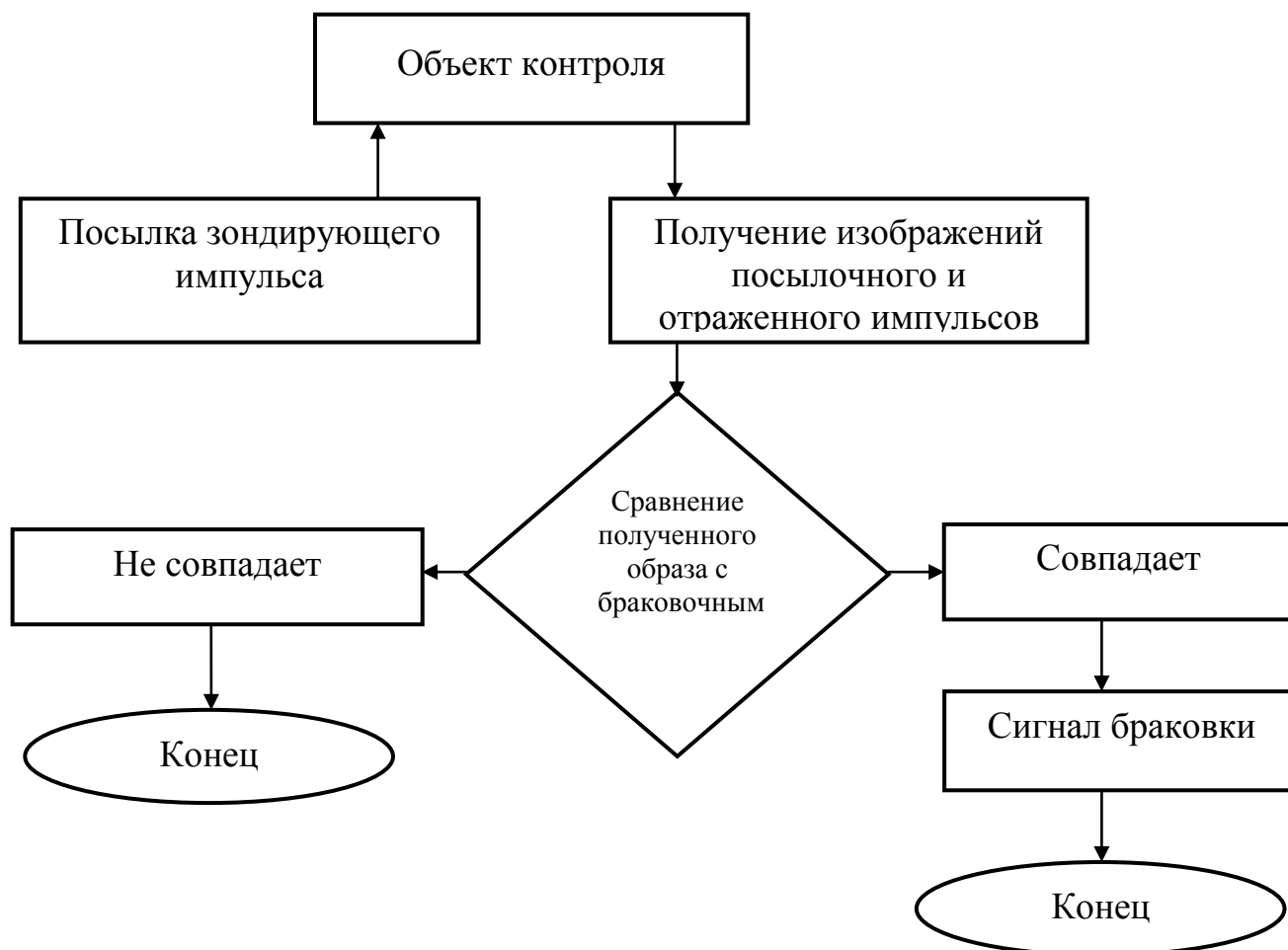


Рис. 1.1. Алгоритм диагностирования детали ультразвуковым импульсным дефектоскопом

Различают ошибки диагностирования двух видов:

- пропуск дефекта или принятия неисправного объекта за исправный;
- ложное показание или принятие исправного объекта за неисправный.

По результатам диагностирования, как правило, принимается одно из двух решений:

- объект диагностики можно продолжать эксплуатировать (работоспособное состояние);
- объект должен был изъят для восстановления работоспособного состояния или для исключения из инвентаря (неработоспособное или неисправное состояние).

На рис. 1.1 для примера приведен алгоритм ультразвуковой дефектоскопии детали.

1.2 Алгоритм диагностирования буксовых узлов подвижного состава на ходу поезда

К аппаратуре теплового контроля технического состояния буксовых подшипников в условиях эксплуатации относятся: ПОНАБ – 3 (выпускался с 1969 по 1984 г.), КТСМ – 01 (с 1998 г.), КТСМ – 02Д (в настоящее время). Её назначение – выявление нагрева подшипников выше установленной предельной температуры бесконтактным способом по инфракрасному излучению стенки корпуса буксы с помощью терморезисторов (болometers).

Схема аппаратуры теплового контроля букс приведена на рис. 1.2, а алгоритм диагностирования букс в движущемся поезде – на рис. 1.3.

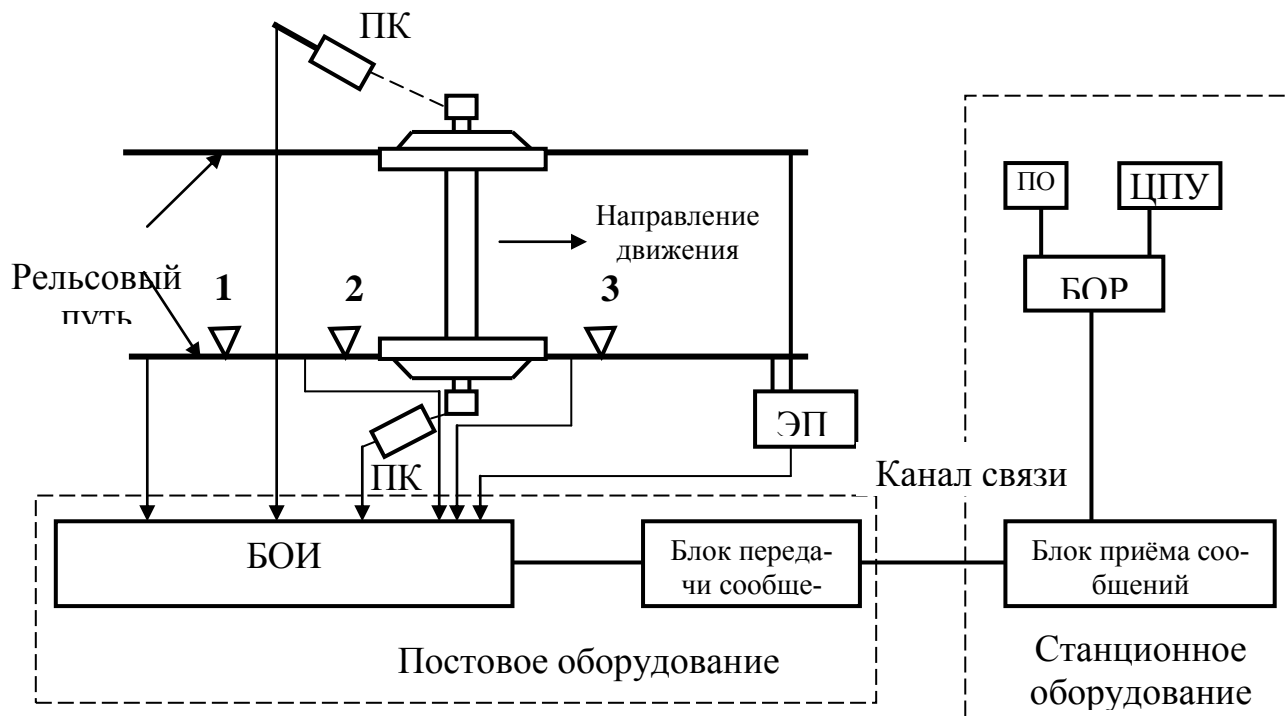


Рис. 1.2. Схема аппаратуры теплового контроля букс:

ПКП, ПКЛ – напольные (приемные) камеры (правая и левая); 1, 2, 3 – датчики прохода колесных пар; ЭП – электронная педаль прохода поезда; БОИ – блок обработки информации; БОР – блок обеспечения сигнализации и регистрации; ПО – пульт оператора; ЦПУ – регистрирующее цифропечатающее устройство

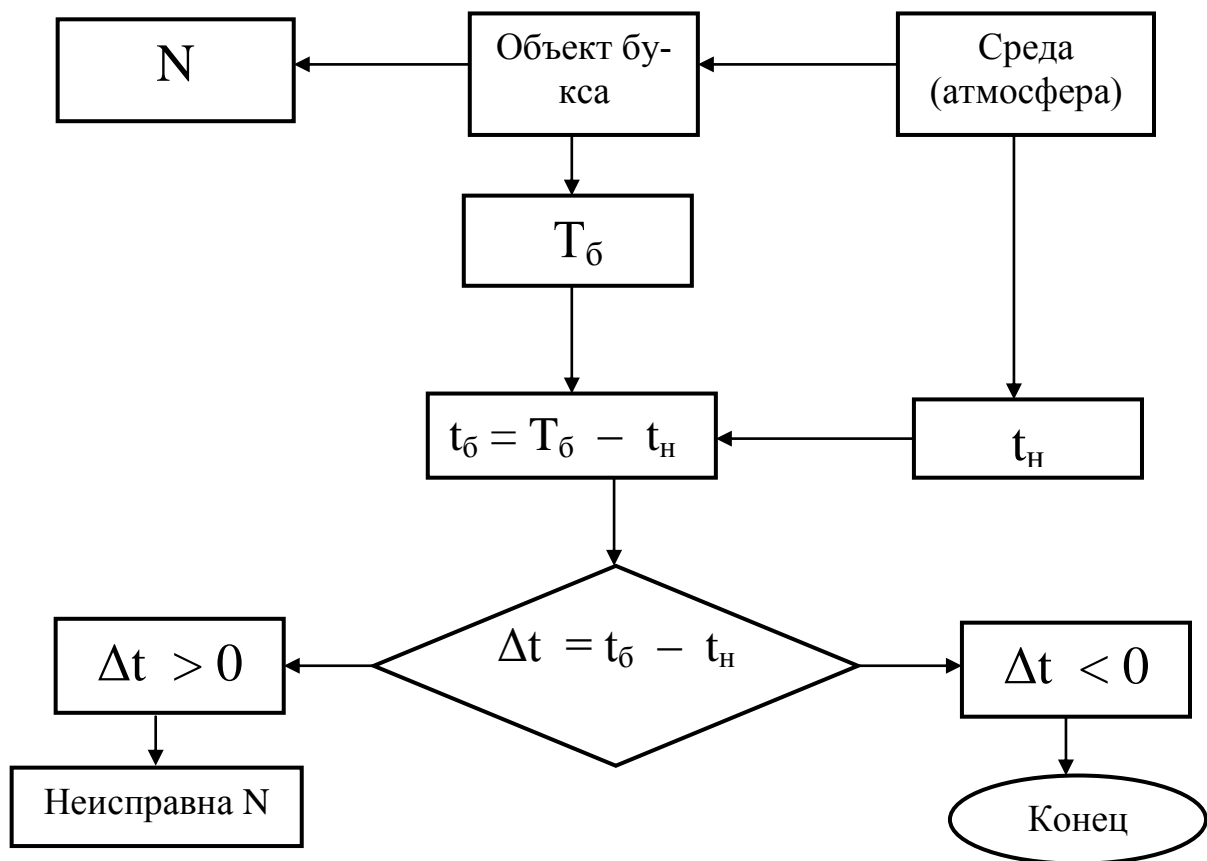


Рис. 1.3. Алгоритм диагностирования букс в движущихся поездах методом теплового контроля:

$T_б$ – абсолютная температура буксы; $t_н$ – температура воздуха;
 $t_б$ – температура буксы при $t_н = 0^0$; $t_н$ – пороговое значение температура буксы;
 N_i – порядковый номер контролируемой буксы; Δt – разница между измеренным и пороговым значением температуры буксы

1.3 Алгоритм диагностирования подшипников виброакустическим методом

Для оценки технического состояния подшипников подвижного состава при плановых ремонтах применяют различные виброакустические установки (УДП – 2001, ОМСД – 02, СВП – 01, СКБУ и д.р.). Виброакустический метод основан на том, что неисправные детали подшипников в процессе их вращения под нагрузкой создают ударные импульсы (импульсы ударной силы). В результате возбуждаются упругие колебания корпуса буксы. Измеряют амплитуды виброускорений колебаний корпуса буксы с помощью пьезоэлектрических или иных акселерометров (ускорениемеров) и сравнивают с заданным пороговым значением. Для сравнения используется число колебаний с ускорением, превысившим пороговое значение в течение заданного периода реализации. Алгоритм диагностирования подшипников на установках приведен на рис. 1.4.

Установка конструктивно состоит из стенда для установки размещения и вращения колесной пары и пульта управления с диагностическим блоком.

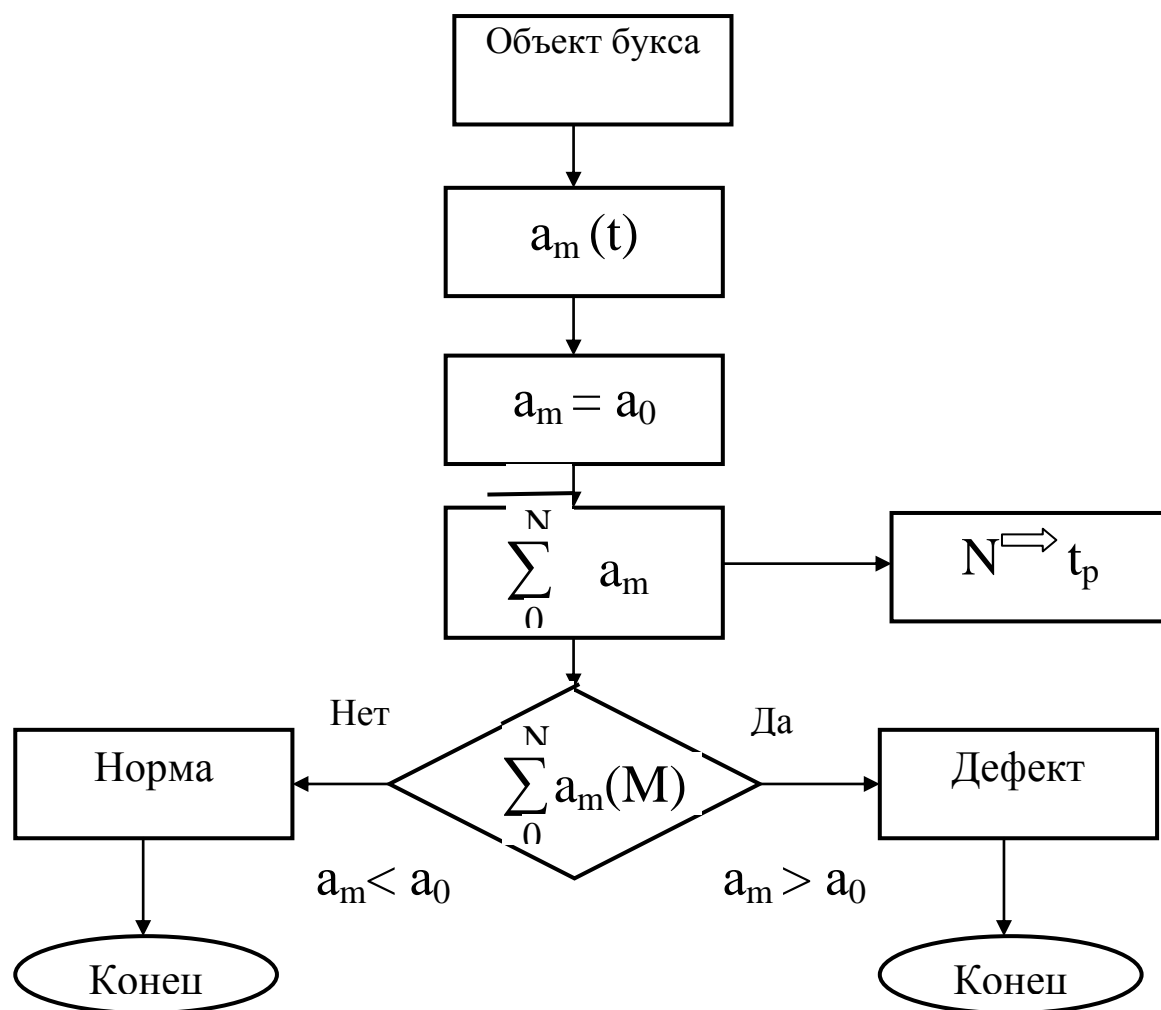


Рис. 1.4. Алгоритм диагностирования подшипников
виброакустическим методом:

$a_m(t)$ – пиковые отдельные значения амплитуды сигнала (виброускорений);
 a_0 – пороговый уровень амплитуды сигнала; N – реализуемое количество оборотов сепаратора подшипника; t_p – заданное время реализации процесса;
 M – пороговое значение количества сигналов, превысивших пороговый уровень ($a_m > a_0$)

1.4 Алгоритмы диагностирования в области организации и технологии производства

Алгоритмы широко используются при создании автоматизированных систем контроля качества изготовления и ремонта узлов и деталей подвижного состава, определяемого уровнем организации производства, квалификацией работников, степенью механизации и автоматизации технологических процессов.



Рис. 1.5. Алгоритм работы системы «АСК – СТД»

Основой управления качеством в соответствии со стандартом ISO 9000-2000 являются контроль производства и использование систем автоматизированного измерения технологических параметров и характеристик ремонтируемых узлов и деталей. Современные вагоноремонтные предприятия в связи с этим дооснащаются средствами технического и программного обеспечения, применяемыми в автоматизированных системах управления (АСУ). Это позволяет оптимизировать технологию производства и повысить эффективность принятия решений за счет снижения влияния человеческого фактора.

Фирма «Агроэл» (г. Рязань) разработала автоматизированную систему контроля соблюдения технологической дисциплины («АСК – СТД») при освидетельствовании колесных пар типа РУ1 – 950 и РУ1Ш – 950 в колесно-роликовых участках депо. Эта система – формализованное программно – поддерживаемое электронное описание процессов организации и управления деятельностью колесно-роликового участка с указанием используемых технологических ресурсов и критериев управления.

Контроль операций и сбор технологической информации производится с помощью пультов ввода, размещенных на каждой технологической позиции и объединенных в единую информационно – вычислительную сеть. Информация обрабатывается на IBM PCAT с помощью операционной системы Windows.

Для наглядности динамического образа технологического процесса интерфейс программы выполнен в виде мнемонической схемы с символьным отображением характера действия на технологических операциях.

Непосредственное управление производственным участком ведется в серверных персональных компьютерах. Изменение состояния хода технологического процесса контролируется в реальном времени.

Алгоритм работы системы «АСК – СТД» приведен на рис. 1.5.

Использование в системе «АСК – СТД» комплексных показателей производительности и качества готовой продукции позволяет:

- получать информацию о фактических показателях каждую смену и по каждому отремонтированному изделию;
- производить количественный расчет качества ремонта и производительности с учетом существующего технологического оборудования и технической квалификации работников депо;
- прогнозировать улучшение качества ремонта и повышение производительности за счет замены устаревшего технологического оборудования на более совершенное.

2 РАСЧЕТ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

2.1 Общие понятия о надежности

Надежность технического объекта в общем случае есть свойство, включающее безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость (ГОСТ 27.002 – 83).

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Надежность технической системы невозможно установить без статистической информации, к которой предъявляются следующие требования:

- своевременность;
- регулярность получения;
- достоверность;
- полнота сведений;
- единообразие форм технической информации.

Первичная информационная документация должна содержать:

- NN вагонов, марку и N узла вагона, завод-изготовитель, дату изготовления, депо приписки;
- виды и даты ремонта;
- продолжительность работы после ремонта или ввода в эксплуатацию, даты обнаружения отказа или неисправности, где и кем устранена неисправность;
- наименование основных узлов, подлежащих исследованию;
- сведения о причинах повреждений (недостаток конструкции, некачественный ремонт, нарушение правил эксплуатации);
- предложения по совершенствованию конструкции узлов и агрегатов, технологии их ремонта.

2.2 Методика статистической обработки информации

Пример 2.1. Определить показатели надежности окатышевозов металлургического завода за 1 год их эксплуатации. Общее количество окатышевозов $N = 126$.

Решение

1 Длительность работы вагона до отказа группируем по интервалам. Для удобства величину интервала принимаем равной одному месяцу (табл. 2.1).

В каждом интервале подсчитывается число реализаций длительности работы до отказа и определяется статистическая частота

$$f_i = \frac{n_i}{n \cdot \Delta t}, \quad (2.1)$$

где n_i – число реализаций длительности работы до отказа в i -м интервале (число отказов в интервале);

n – объем выборки (количество исследуемых вагонов);

Δt – величина интервала.

$$\text{Так, } f_1 = \frac{2}{126 \cdot 1} = 0,016 ; f_2 = \frac{6}{126 \cdot 1} = 0,048 ; \text{ и т.д.}$$

Распределение показателей безотказности, представлено в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Распределение показателей безотказности

Показатели	Месяцы											
	0 1	1 2	2 3	3 4	4 5	5 6	6 7	7 8	8 9	9 10	10 11	11 12
n_i	2	6	6	16	12	10	7	12	11	10	1	3
N_i	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126
f_i	0,016	0,048	0,048	0,127	0,095	0,079	0,056	0,095	0,087	0,079	0,008	0,024
Q_i	0,016	0,064	0,112	0,239	0,334	0,413	0,469	0,564	0,651	0,730	0,738	0,762
P_i	0,984	0,936	0,888	0,761	0,666	0,587	0,531	0,436	0,349	0,230	0,262	0,238

2 Вероятность отказа в i -м интервале

$$Q_i = \sum_{j=1}^i f_j \cdot \Delta t. \quad (2.2)$$

Так, для 1-го интервала

$$Q_1 = 0,016 \cdot 1 = 0,016.$$

Для 2-го интервала

$$Q_2 = (0,016 + 0,048)1 = 0,064.$$

Для 3-го интервала

$$Q_3 = (0,016 + 0,048 + 0,048)1 = 0,112 \text{ и т. д.}$$

3 Вероятность безотказной работы для каждого интервала

$$P_i = 1 - Q_i. \quad (2.3)$$

Полученные в табл. 2.1 данные говорят о том, что за год работы (перед плановым ремонтом) вероятность безотказной работы окатышевозов изменялась до 0,238, т.е. только 24 % вагонов могут проработать в течение года без отцепки в текущий ремонт, остальные вагоны откажут.

3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И АППАРАТУРЫ

Для оценки технического состояния деталей (узлов) подвижного состава на всех стадиях жизненного цикла применяют систему методов контроля, включающую себя:

- визуальный метод;
- измерительный метод;
- разрушающие методы (если это предусмотрено НТД);
- неразрушающие методы.

Магнитопорошковый и ультразвуковой методы НК занимают лидирующее место по объему контроля.

3.1 Определение способа магнитопорошкового метода контроля (МПК)

Выявляемость дефектов при МПК зависит от многих факторов, которые следует учитывать при реализации этого метода и условиях предприятий железнодорожного транспорта, машиностроения, нефтегазовой промышленности, в сварочном производстве.

Выбор способа МПК осуществляется в зависимости от магнитных свойств материала деталей и требуемой чувствительности контроля.

Под чувствительностью МПК понимают минимальные размеры (ширину раскрытия и протяженность) дефектов, выявляемых в заданных условиях с помощью этого метода. ГОСТ 21105 – 87 введено понятие о трех условных уровнях чувствительности;

- уровень А, при котором обнаруживается дефект с минимальным раскрытием 2,0 мкм и длиной 0,5 мм;
- уровень Б, когда обнаруживается дефект с раскрытием 10,0 мкм и той же протяженностью;
- уровень В, если выявляется дефект с раскрытием 25,0 мкм.

Уровни чувствительности А, Б и В установлены для условных дефектов в виде щели с плоскопараллельными стенками, перпендикулярными контролируемой детали. При этом глубина условного дефекта в 10 раз больше его ширины. ГОСТ регламентирует шероховатость поверхности объекта контроля: для условного уровня А – не более 2,5 мкм, для условных уровней Б и В – не более 10 мкм. При шероховатости более 10 мкм условные уровни чувствительности не нормируются.

Согласно ГОСТ 21105-87 при магнитопорошковом методе применяют два способа контроля:

- способ остаточной намагниченности (СОН);
- способ приложенного поля (СПП).

СОН применяют при контроле деталей из магнитотвердых материалов с коэрцитивной силой $H_c > 10$ А/см (внутренние и наружные кольца подшипников, ролики) и остаточной индукцией 0,5 Тл и более. При этом деталь предва-

рительно намагничивают, затем выключают намагничивающее устройство (или снимают его) и наносят на контролируемую поверхность магнитный индикатор. Осмотр поверхности проводят как в процессе стекания суспензии, так и после стекания ее основной массы. Промежуток времени между намагничиванием и осмотром детали не должен превышать одного часа.

Если известны магнитные характеристики материала изделия – коэрцитивная сила H_c и остаточная магнитная индукция B_r , то можно оценить достижение требуемого уровня чувствительности при реализации СОН, используя кривые $B_r = f(H_c)$, приведенные на рис. 3.1.

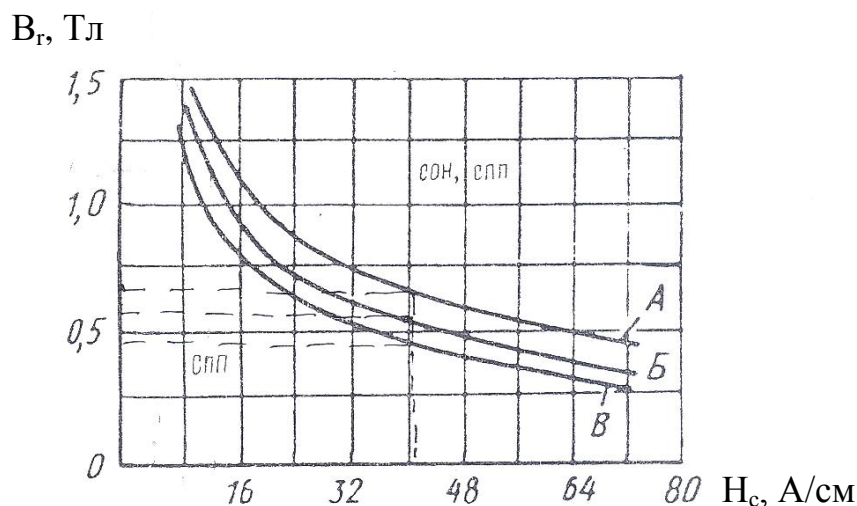


Рис. 3.1. Зависимость остаточной магнитной индукции от коэрцитивной силы

При контроле СПП операции намагничивания изделий и нанесения магнитного индикатора (порошка или суспензии) выполняют одновременно. Индикаторные рисунки выявляемых дефектов образуются в процессе намагничивания. Намагничивание прекращают после стекания основной массы суспензии. Осмотр детали проводят как в действующем намагничивающем поле, так и после прекращения намагничивания.

СПП применяют в основном для контроля деталей из магнитомягких материалов: сталей марок Ст 3, Ст 10, Ст 20 и других углеродистых незакаленных сталей или конструкционных сталей после отпуска (рамы тележек пассажирских, рефрижераторных вагонов, подвески тормозных башмаков, тормозные тяги, валики центрального люлечного подвешивания тележек), у которых $H_c \leq 10$ А/см и $B_r < 0,5$ Тл.

При неизвестных магнитных характеристиках ферромагнитного материала контролируемой детали должен применяться контроль способом приложенного поля.

Способ приложенного поля дает возможность достигнуть условного уровня чувствительности А при контроле деталей из практически всех марок ферромагнитных сталей.

Контроль способом приложенного поля применяют если:

- деталь имеет сложную форму и большие размеры;

- детали контролируют за несколько приемов;
- деталь намагничивают одним из способов комбинированного намагничивания;
- деталь простой формы имеет отношение длины к эквивалентному диаметру не менее 5.

Контроль СОН с требуемой чувствительностью возможен, если остаточная индукция V_r при известном значении коэрцитивной силы H_c равна или больше значения V_r , определенной по соответствующей кривой (см. рис. 3.1).

Оценку V_r при заданном значении H_c можно рассчитать аналитически:

- для условного уровня чувствительности А:

$$V_r = \frac{12,21}{H_c} + 0,33; \quad (3.1)$$

- для условного уровня чувствительности Б:

$$V_r = \frac{11,48}{H_c} + 0,20; \quad (3.2)$$

- для условного уровня чувствительности В:

$$V_r = \frac{8,54}{H_c} + 0,21. \quad (3.3)$$

В случае, когда значения остаточной индукции V_r контролируемой стали (при известной H_c) лежат ниже кривой V_r (см. рис. 3.1) контроль проводится СПП. Возможность контроля в режиме остаточной намагниченности можно также определить по справочным таблицам. Конкретный уровень чувствительности (минимальную ширину выявляемого условного дефекта) можно найти из рис. 3.2.

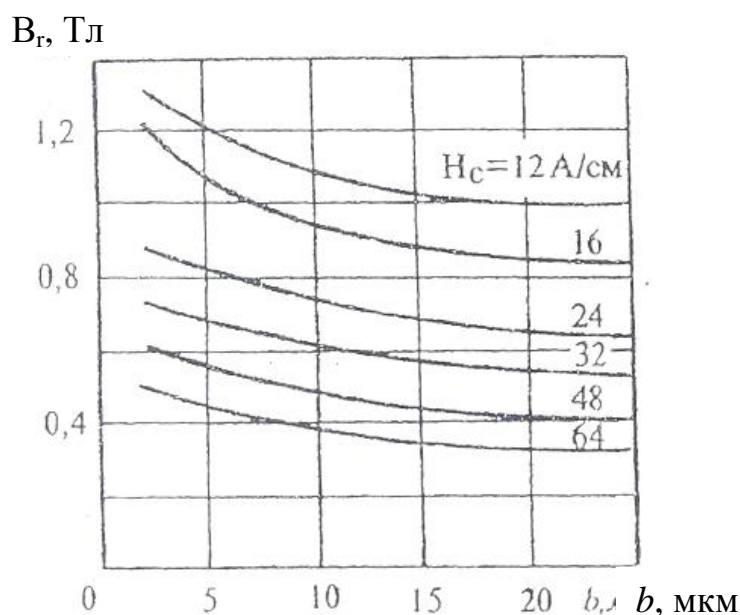


Рис. 3.2. Кривые для определения уровня чувствительности при контроле с применением способа остаточной намагниченности для изделий с различной коэрцитивной силой

Для этого необходимо найти точку пересечения кривой, соответствующей коэрцитивной силе стали H_c со значением остаточной индукции B_r для данной стали. Абсцисса точки пересечения соответствует искомому уровню предельной чувствительности.

Контроль способом остаточной намагниченности целесообразно применять для деталей простой формы, с большим отношением её длины к эквивалентному диаметру, если:

- намагничивание производят импульсным током;
- требуется высокая производительность контроля;
- имеются специальные требования, ограничивающие нагрев детали при контроле или обгорание её кромок.

ПРИМЕРЫ определения способа магнитопорошкового метода контроля

Пример 3.1. Наружное кольцо подшипника изготовлено из стали ШХ15, прошло закалку при $t = 840^\circ$ и отпуск $t = 150^\circ \text{C}$. В соответствии с правилами ремонта трещины не допускаются. Следовательно, необходим контроль детали при высоком условном уровне чувствительности А. Определить способ контроля.

Решение. Из табл. 1.1 [3] находим, что коэрцитивная сила H_c для материала ШХ15, при данных режимах термообработки составляет 41,4 А/см, а остаточная магнитная индукция $B_r = 0,79$ Тл. На оси абсцисс графика $B_r = f(H_c)$ откладываем значение $H_c = 41,4$ А/см, через эту точку проводим нормаль к оси абсцисс до пересечения с кривой, соответствующей условному уровню чувствительности А. Через эту точку пересечения проводим горизонтальную линию до пересечения с осью ординат. На этой оси считываем значение требуемой B_r (для нашего случая $B_r = 0,7$ Тл). Поскольку остаточная индукция (0,79 Тл) больше требуемой (0,7 Тл), то рекомендуется проводить СОН.

Пример 3.2. Стопорная планка изготовлена из стали Ст 5 и используется в состоянии поставки. $R_a = 2,5$ мкм. Трещины в ней не допускаются, т. е. контроль следует проводить с условным уровнем чувствительности А. Определить способ контроля.

Решение. Из табл. 1.1 [3] находим: $H_c = 4,8$ А/см, B_r составляет $\approx 1,1$ Тл. Поскольку остаточная индукция 1,1 Тл меньше требуемой $\approx 2,0$ Тл, то контроль СОН применять не рекомендуется. Целесообразно проводить контроль СПП при любом уровне чувствительности.

Пример 3.3. Определить способ магнитопорошкового контроля клина тягового хомута, изготовленного из стали 38ХС. Термообработка – закалка при $t = 850^\circ \text{C}$ и отпуск при $t = 500\text{--}600^\circ \text{C}$. Условный уровень чувствительности А.

Решение. Согласно табл. 1.1 [3] величина остаточной индукции $B_r = 0,95$ Тл, а коэрцитивной силы $H_c = 12,5$ А/см. По графику $B_r = f(H_c)$ устанавливаем, что для выявления дефектов в соответствии с условным уровнем чувствительности А рекомендуется способ приложенного поля (СПП).

Пример 3.4. Установить способ МПК при подтверждении дефекта в боковой раме грузовой тележки модели 18-100, изготовленной из стали 20Г1ФЛ. Условный уровень чувствительности – В. Термообработка – нормализация с последующим высоким отпуском.

Решение. Согласно табл. 1.1 [3] для стали 20Г1ФЛ (20 ГСЛ) $B_r = 1,15$ Тл, а $H_c = 3,9$ А/см. При $H_c < 10$ А/см (ГОСТ 21105 – 87) требуется СПП с применением электромагнита МЭД-120 согласно РД32.159 – 2000.

3.2 Расчет параметров магнитных полей (МП)

при магнитопорошковом методе контроля деталей подвижного состава

Расчет параметров магнитных полей включает в себя:

- расчет магнитной индукции;
- расчет магнитного потока;
- расчет магнитной проницаемости;
- расчет напряженности магнитного поля;
- расчет силы намагничивающего тока при циркулярном и полюсном намагничивании детали;
- расчет магнитодвижущей силы и магнитного сопротивления;
- расчет намагниченности.

На практических занятиях рекомендуется произвести расчет параметров магнитного поля вокруг проводника с током, в детали при намагничивании её на центральном проводнике, в соленоиде.

Расчет магнитной индукции В, Тл

Магнитная индукция определяется по механическому воздействию магнитного поля на проводник с током и рассчитывается по формуле

$$B = \frac{F}{I \cdot L}, \quad (3.4)$$

где F – сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле, Н;

I – сила тока в проводнике, А;

L – длина проводника, м.

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}. \quad (\text{Тесла})$$

Расчет магнитного потока Φ , Вб

Магнитный поток (Φ) – число магнитных силовых линий, проходящих через рассматриваемую поверхность, определяется по формуле

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad (3.5)$$

где B – магнитная индукция, Тл;

S – площадь плоскости, пронизываемой магнитными силовыми линиями, м²;

α – угол между направлением магнитных силовых линий и плоскостью.

1 Вебер – магнитный поток, создаваемый однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через площадку в 1 м^2 , нормальную к направлению поля.

Если поместить в магнитное поле соленоид, состоящий из N витков, то суммарный магнитный поток, пронизывающий все витки, называемый потоко-сцеплением Ψ , определяется из соотношения

$$\Psi = \Phi \cdot N. \quad (3.6)$$

Расчет магнитной проницаемости μ , $\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$

Различают:

- абсолютную магнитную проницаемость μ_a ;
- магнитную проницаемость вакуума μ_0 ;
- относительную магнитную проницаемость μ_r .

$$\mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_0}. \quad (3.7)$$

В зависимости от μ_r все материалы делятся на три группы:

- диамагнитные, у которых $\mu_r < 1$ (цинк, свинец, золото и др.);
- парамагнитные, у которых $\mu_r > 1$ (марганец, алюминий, платина и др.);
- ферромагнитные, у которых $\mu_r \gg 1$ (железо, кобальт, никель и их сплавы).

Магнитный контроль применим только для деталей из ферромагнитных материалов $\mu_r \geq 40$ (ГОСТ 21105 – 87).

Расчет напряженности магнитного поля H , $\frac{\text{А}}{\text{м}}$, $\frac{\text{А}}{\text{см}}$

Напряженность магнитного поля – вспомогательная расчетная величина, не зависящая от магнитных свойств среды, и учитывающая только влияние на интенсивность магнитного поля значения тока, расположение магнитов и проводников с токами.

Напряженность магнитного поля (H) – векторная величина, совпадающая по направлению с вектором магнитной индукции (B).

Вектор H можно разложить на две составляющие:

- нормальную H_n , перпендикулярную поверхности детали;
- тангенциальную H_t , параллельную поверхности детали.

Численное значение H определяют из соотношения

$$H = \frac{B}{\mu_a}, \quad (3.8)$$

$1 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ – напряженность магнитного поля, индукция которого в вакууме равна $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Т}$.

Расчет намагниченности J , $\frac{\text{А}}{\text{м}}$

Способность материала намагничиваться объясняется существованием в нем элементарных (молекулярных) токов (рис. 3.3).

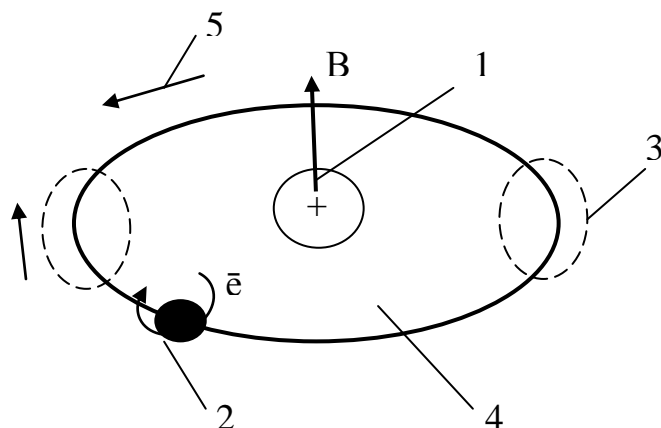


Рис. 3.3. Молекулярные токи:

1 – вращение электрона \bar{e} вокруг ядра 1 в атоме; 2 – вращение электрона \bar{e} вокруг собственной оси (спин электрона); 3 – вращение орбит электронов (прецессия электронных орбит); 4 – плоскость электронных орбит; 5 – направление тока; B – индукция магнитного поля (МП)

Ферромагнитный материал состоит из малых областей (0,001 мм) – доменов, в которых элементарные токи самопроизвольно направлены согласно. В различных зонах материала МП доменов направлены хаотично и компенсируют друг друга. Результирующее поле в детали равно нулю.

При намагничивании под действием внешнего поля вектора напряженности H устанавливаются по направлению внешнего МП, их магнитные поля суммируются. Материал намагничен. После снятия внешнего поля векторы отдельных доменов под воздействием внутренних напряжений в металле приходят в состояние остаточной намагниченности (рис. 3.4).

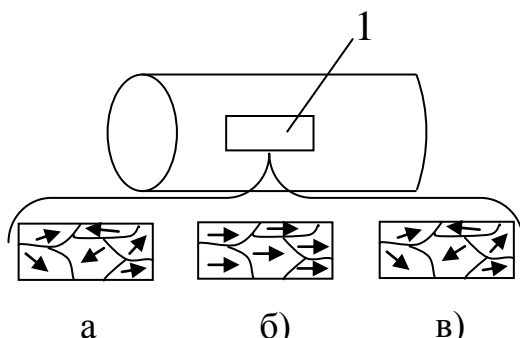


Рис. 3.4. Схема расположения доменов в образце 1:

а) – образец 1 размагничен, $H = 0$; б) – образец 1 в магнитном поле, $H \neq 0$;
в) – намагниченное поле снято $H \neq 0$

Намагниченность J – степень согласованной ориентации МП доменов в металле, т. е. индукция, создаваемая элементарными токами и зависящая от H, действующей на эту деталь.

$$J = \frac{M_A}{V}, \quad (3.9)$$

где M_A – магнитный момент;
V – объем.

В примерах приведены расчет силы намагничивающего тока при циркулярном и полюсном намагничивании детали, а также расчет магнитодвижущей силы и магнитного сопротивления.

ПРИМЕРЫ

Пример 3.5. В однородное магнитное поле индукцией $B = 0,4$ Тл помещен намагничивающий кабель длиной $0,3$ м с током 1000 А под прямым углом к магнитным линиям. Определить механическую силу, действующую на кабель.

Решение: $F = B \cdot L \cdot J = 0,4 \cdot 1000 \cdot 0,3 = 120$ Н.

Пример 3.6. Вектор магнитной индукции направлен к проверяемой поверхности под углом 35° , $B = 20$ мТл. Определить нормальную B_n и тангенциальную B_t составляющие поля и их отношение $\Theta = B_n/B_t$.

Решение

$$B_n = B \sin 35^\circ = 20 \cdot 0,57 = 11,4 \text{ мТл},$$

$$B_t = B \cos 35^\circ = 20 \cdot 0,82 = 16,3 \text{ м},$$

$$\Theta = 11,4/16,3 = 0,69.$$

Пример 3.7. Линии магнитной индукции падают на плоскость под углом 30° . Определить поток Φ через плоскость, если ее односторонняя поверхность равна $0,02 \text{ м}^2$, а магнитное поле однородное, $B = 2000$ Гс.

Решение. $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = 0,2 \cdot 0,02 \cdot 0,87 = 3,48 \cdot 10^{-3}$ Вб ($1 \text{ мТл} = 10 \text{ Гс}$; $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$; $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вебер/м}^2$).

Если поместить в магнитное поле соленоид, состоящий из нескольких витков, то каждый из витков будет пронизываться магнитным потоком.

Суммарный магнитный поток, пронизывающий все витки контура, или как говорят, магнитный поток, сцепленный со всеми витками, называется потоко-сцеплением Ψ .

Если все витки одинаковы, то суммарный магнитный поток, т. е. потоко-сцепление

$$\Psi = \Phi \cdot N, \quad (3.10)$$

где Φ – магнитный поток через один виток соленоида;

N – число витков.

Пример 3.8. Определить потоко-сцепление (общий магнитный поток) внутри соленоида, если индукция $B = 0,2$ Тл. Число витков соленоида $N = 6$, сечение окна соленоида $S = 1 \text{ дм}^2$.

Решение

$$\Psi = \Phi \cdot N = B \cdot S \cdot N = 0,2 \cdot 0,01 \cdot 6 = 0,012 \text{ Вб}.$$

Пример 3.9. Определить ток в тороидальной обмотке из 10 витков гибкого кабеля для намагничивания наружного кольца подшипника 30-232726 до индукции $B = 1,2$ Тл. Наружный диаметр кольца 250 мм, внутренний – 224 мм. Сечение кольца $S = 13,2 \text{ см}^2$. Магнитная проницаемость материала кольца

$$\mu_a = 4\pi \cdot 10^{-5} \text{ Гн/м}.$$

Решение

1 Магнитный поток:

$$\Phi = B \cdot S = 1,2 \cdot 13,2 \cdot 10^{-4} = 15,84 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

2 Определим длину средней магнитной линии:

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{224 + 250}{2} \cdot 3,14 = 237 \cdot 3,14 = 744,2 \text{ мм} = 0,744 \text{ м.}$$

3 Магнитодвижущая сила:

$$F = \Phi \cdot R_m, \quad (3.11)$$

где R_m – магнитное сопротивление.

$$R_m = \frac{\ell_{\text{ср}}}{\mu_a \cdot S}. \quad (3.12)$$

Тогда

$$F = 15,84 \cdot 10^{-4} \frac{0,744}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-5} \cdot 13,2 \cdot 10^{-4}} = 7108,3 \text{ А} \cdot \text{В.}$$

При $n = 10$ витков ток в тороидальной обмотке:

$$I = \frac{F}{n} = \frac{7108,3}{10} = 711 \text{ А.}$$

Пример 3.10. Ток в проводе равен 1200 А. Определить напряженность поля в точке, отстоящей от оси провода на 200 мм.

Решение

Напряженность поля определяется по формуле

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{1200}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,2} = \frac{1200}{1,256} = 955,4 \text{ А/м}$$

Пример 3.11. Определить ток в кабеле для получения магнитного поля напряженностью 100 А/см в точке, отстоящей от оси провода на расстоянии 100 мм.

Решение

Ток определяется по формуле

$$I = H \cdot 2\pi r = 10\,000 \text{ А/м} \cdot 6,28 \cdot 0,1 = 6280 \text{ А.}$$

На рис. 3.5 показано распределение индукции B при намагничивании ферромагнитной детали 8 на центральном проводнике 9 с током I .

Магнитная индукция на участке 0–2 изменяется по закону $B = \frac{I r}{2\pi r_0^2} \cdot \mu_0$,

на участке 2–3; 6–7 по закону $B = \frac{I}{2\pi r} \cdot \mu_0$.

Скачки индукции B на участках 3–4, 5–6 обусловлены ферромагнетизмом детали 8 (r_0 – радиус проводника; r – расстояние от центра проводника).

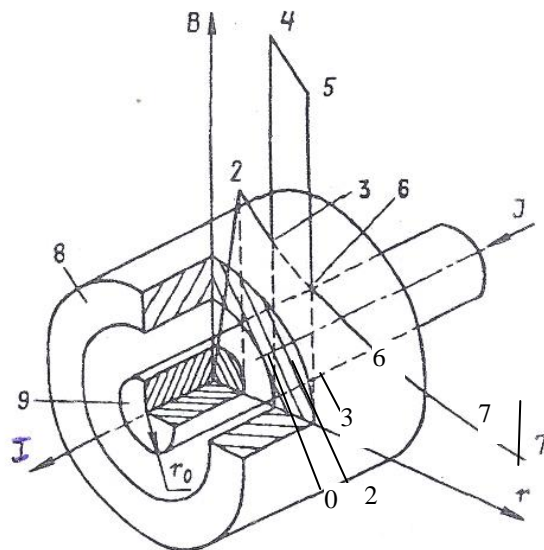


Рис. 3.5. Распределение индукции магнитного поля при намагничивании проверяемой детали 8 на центральном проводнике 9 с током I

На рис. 3.6 показано распределение поля H внутри и вне детали 4, намагничиваемой пропусканием по ней тока I.

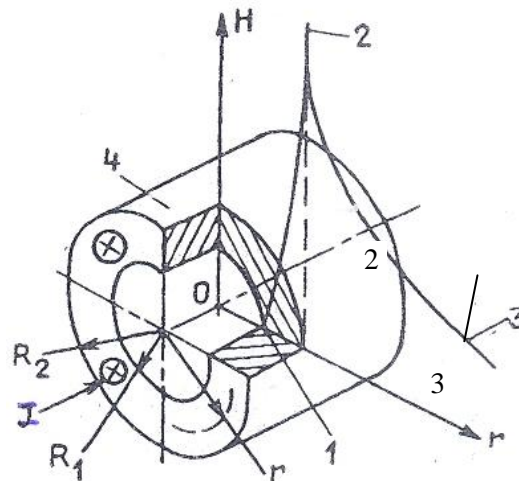


Рис. 3.6. Распределение поля H внутри и вне детали 4, намагничиваемой пропусканием по ней тока I

Из рис. 3.6 очевидно, что поле изменяется на участке 0–1 по закону $H = 0$; 1–2 по закону $H = \frac{I}{2\pi} \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2}$; 2–3 по закону $H = \frac{I}{2\pi r}$.

Пример 3.12. Цилиндрическую полуо деталь намагничивают на центральном проводнике. Определить силу тока в проводнике для получения индукции $B = 12,56$ мТл на внутренней поверхности детали диаметром 80 мм.

Решение. Сила тока в проводнике определяется по формуле

$$I = \frac{B \cdot 2 \pi r}{\mu_0}, \quad (3.13)$$

$$I = \frac{12,56 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 0,08}{4 \pi \cdot 10^{-7}} = 2512 \text{ А.}$$

Распределение поля внутри и вне полой детали, намагничиваемой пропусканием по ней тока, показано на рис. 3.6. Видно, что поле внутри детали радиусом R_1 равно нулю. Поле на участке 1–2 (внутри материала детали) изменяется по закону

$$H = \frac{I(r^2 - R_1^2)}{2\pi(R_2^2 - R_1^2)}, \quad (3.14)$$

а на участке 2–3 – по закону $H = \frac{I}{2\pi r}$. По этой формуле определяют напряженность поля на внешней поверхности детали или на некотором расстоянии от нее.

Пример 3.13. По цилиндрической детали диаметром 50 мм пропускают ток силой 1000 А. Определить напряженность поля в точках, находящихся от поверхности детали на расстоянии 100 мм и непосредственно на поверхности детали.

Решение. Напряженность поля на расстоянии 100 мм от поверхности детали определяется по формуле

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{1000}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,125} = 1273,9 \text{ А/м.}$$

Напряженность поля на поверхности детали.

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{1000}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,05} = 6369,4 \text{ А/м.}$$

Сила тока при циркулярном намагничивании определяется из соотношений

$$I = \frac{H}{4} \cdot D, \quad (3.15)$$

где H – напряженность поля на поверхности детали, Эрстед (Э);

D – диаметр детали в мм.

$$I = \frac{1,256 \cdot H \cdot D}{4} = 0,3 \cdot H \cdot D, \quad (3.16)$$

где H – напряженность поля на поверхности детали, А/см;

D – диаметр детали в мм.

$$I = 3 \cdot H \cdot D, \quad (3.17)$$

где H – напряженность поля на поверхности детали, А/см.

При контроле СОН напряженность H_m соответствует техническому насыщению материала, а при контроле СПП напряженность соответствует тангенциальной составляющей поля на поверхности детали. Значения максимальной

H_m для различных материалов приведены в справочниках по магнитному контролю, конструкционным материалам.

Приложенное поле $H_{\text{пр}}$ можно определить по графикам (ГОСТ 21105 – 87) или по формулам (описывающим эти графики) при намагничивании:

уровни условной чувствительности составляют:

$$\text{– по режиму А: } H_{\text{пр}} = 41,3 + 1,3H_c; \quad (3.18)$$

$$\text{– по режиму Б: } H_{\text{пр}} = 19,3 + 1,1H_c; \quad (3.19)$$

$$\text{– по режиму В: } H_{\text{пр}} = 15,2 + 1,1H_c, \quad (3.20)$$

где H_c – коэрцитивная сила, А/см.

Выбор режима А, Б, В зависит от условий, целей контроля, особенностей проверяемой детали.

Пример 3.14. Определить ток циркулярного намагничивания сплошной цилиндрической детали при контроле способом остаточной намагниченности, если $H_m = 80$ А/см, диаметр детали 100 мм.

Решение

$$I = \frac{1,256 \cdot H \cdot D}{4} = \frac{80 \cdot 1,256}{4} \cdot 100 = 2512 \text{ А.}$$

Пример 3.15. Определить ток для намагничивания на стержне с целью выявления трещин на внутренней поверхности трубы диаметром 50 мм. Контроль на остаточной намагниченности, $H_m = 100$ Э.

Решение

$$I = \frac{H}{4} \cdot D = \frac{100}{4} \cdot 50 = 1250 \text{ А.}$$

Пример 3.16. Определить ток для намагничивания в приложенном поле по режиму А сплошной цилиндрической детали диаметром 80 мм. $H_c = 35$ А/см.

Решение

$$H_{\text{пр}} = 41,3 + 1,3H_c = 41,3 + 1,3 \cdot 35 = 86,8 \text{ А/см.}$$

$$I = 3 \cdot H \cdot D = 3 \cdot 86,8 \cdot 8 = 2083 \text{ А.}$$

Пример 3.17. Определить ток намагничивания при контроле в приложенном поле по режиму В детали диаметром 40 мм, $H_c = 30$ А/см.

Решение

Напряженность приложенного поля

$$H_{\text{пр}} = 15,2 + 1,1H_c = 15,2 + 1,1 \cdot 30 = 48,2 \text{ А/см.}$$

$$I = 3 \cdot H \cdot D = 3 \cdot 48,2 \cdot 4 = 578 \text{ А.}$$

Пример 3.18. Определить ток циркулярного намагничивания пластины сечением 40×10 мм, длиной 60 мм. $H_c = 30$ А/см, $H_m = 180$ А/см для контроля способом остаточной намагниченности и в приложенном поле по режиму А.

Решение

Ток циркулярного намагничивания деталей в виде пластин (рис. 3.7) определяют по формуле

$$I = 2 \cdot H \cdot a \text{ при } a/b > 10 \quad (3.21)$$

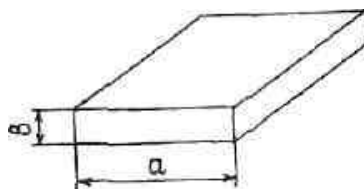


Рис. 3.7. Схема детали, имеющей вид пластины

или по формуле

$$I = 2 \cdot H \cdot (a + b) \text{ при } a/b < 10, \quad (3.22)$$

где a, b – ширина и высота сечения пластины, см.

$H = H_m$ при контроле на остаточной намагниченности, А/см.

$H = H_{\text{пр}}$ при контроле способом приложенного поля, А/см, определяется по формулам 3.15–3.17 или по графикам ГОСТ 21105-87.

1 Определим отношение a/b :

$$a/b = 40/10 = 4; 4 < 10,$$

поэтому используем формулу (3.16).

2 Определим ток для контроля на остаточной намагниченности:

$$I = 2 \cdot H \cdot (a + b) = 2 \cdot 1180(4 + 1) = 1800 \text{ А.}$$

3 Напряженность поля для контроля в приложенном поле:

$$H_{\text{пр}} = 41,3 + 1,3H_c = 41,3 + 1,3 \cdot 30 = 80,3 \text{ А/см.}$$

$$I = 80,3 \cdot (4 + 1) = 402 \text{ А.}$$

Пример 3.19. Определить напряженность поля в центре соленоида, если ток в его обмотке оставляет 2000 А. Параметры соленоида (рис. 3.8): число витков $n = 6$; длина $\ell = 210$ мм; диаметр $D = 100$ мм.

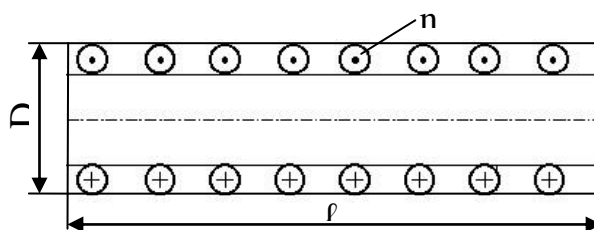


Рис. 3.8. Параметры соленоида

n – число витков; ℓ – длина соленоида; D – диаметр соленоида

Решение

Напряженность поля в центре соленоида

$$H = \frac{I \cdot n}{\sqrt{\ell^2 + D^2}} = \frac{2000 \cdot 6}{\sqrt{21^2 + 10^2}} = 516 \text{ А/см.}$$

Пример 3.20. Соленоид для намагничивания оси имеет параметры: $n = 8$; $\alpha_1 = 10^\circ$; $\alpha_2 = 25^\circ$. Ток в соленоиде 2000 А. Определить напряженность поля:
– в центре соленоида на его оси H_1 ;

– в точке А, расположенной на оси на расстоянии 100 мм от края солено-
ида – H_2 ;

– у края соленоида – H_3 .

Решение

$$H_1 = \frac{I \cdot n}{\sqrt{\ell^2 + D^2}} = \frac{2000 \cdot 8}{\sqrt{40^2 + 10^2}} = 388 \text{ А/см};$$

$$H_2 = \frac{I \cdot n}{\ell} \cdot \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2}{2} = \frac{2000 \cdot 8}{40} \cdot \frac{0,98 - 0,9}{2} = 16 \text{ А/см};$$

$$H_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{I \cdot n}{\sqrt{\ell^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2000 \cdot 8}{\sqrt{40^2 + 5^2}} = 198 \text{ А/см}.$$

При полюсном (продольном) намагничивании с помощью гибкого кабеля, намотанного на деталь в виде соленоида или катушки, следует учитывать размеры контролируемых объектов.

Ток в соленоидах с учетом удлинения детали рассчитывают по формулам:

а) при удлинении детали $\frac{\ell}{d} > 4$

$$W \cdot I = \frac{35000}{\frac{\ell}{d} + 2}; \quad (3.23)$$

б) при удлинении $2 < \frac{\ell}{d} < 4$

$$W \cdot I = \frac{45000}{\frac{\ell}{d}}. \quad (3.24)$$

Пример 3.21. Определить ток в соленоиде для намагничивания шейки оси колесной пары длиной 165 мм и диаметром 130 мм с целью обнаружения поперечных трещин. Соленоид имеет 100 витков.

Решение

1 Определяем удлинение детали

$$\frac{\ell}{d} = \frac{165}{130} = 1,27 < 4.$$

2 Определяем намагничивающую силу:

$$W \cdot I = \frac{45\,000}{\frac{165}{130}} = 35\,433 \text{ Ампер витков}.$$

3 Определяем ток в соленоиде:

$$I = \frac{W \cdot I}{W} = \frac{35\,433}{100} = 354 \text{ А}.$$

Напряженность поля на концах соленоида составляет $0,5 \div 0,8$ от максимального значения в центре соленоида. При внесении в соленоид детали из ферромагнитного материала напряженность магнитного поля за счет размагничивающего действия материала детали уменьшается.

В связи с этим значение тока намагничивания в соленоиде можно определять по формуле [4]

$$I = \frac{(1,15 \div 1,25) H \cdot \ell}{W}, \quad (3.25)$$

где $1,15 \div 1,25$ – коэффициент, учитывающий уменьшение напряженности в соленоиде при внесении в него детали.

Пример 3.22. Определить ток в соленоиде при контроле хвостовика корпуса автосцепки, имеющего размеры: длина хвостовика 650 мм, поперечное сечение 130×140 мм. Соленоид имеет 10 витков медной шины. Напряженность магнитного поля на поверхности корпуса составляет 20 А/см. [4].

Решение

1 Определим эквивалентный диаметр хвостовика.

Периметр хвостовика $P = 2 \cdot 130 + 2 \cdot 140 = 260 + 280 = 540$ мм.

Эквивалентный диаметр $d_s = \frac{P}{\pi} = \frac{540}{3,14} = 172$ мм.

2 Удлинение детали составит:

$$\frac{\ell}{d} = \frac{650}{172} = 3,8 < 4.$$

3 Определим магнитодвижущую силу:

$$W \cdot I = \frac{45000}{\frac{\ell}{d}} = \frac{45000}{3,8} = 11842 \quad \text{Ампер}\cdot\text{витки.}$$

4 Определим ток в соленоиде:

$$I = \frac{W \cdot I}{W} = \frac{11842}{10} = 1184,2 \quad \text{А.}$$

Пример 3.23. Определить ток в намагничивающем гибком кабеле при магнитопорошковом контроле СПП коленчатого вала дизеля, если диаметр коренных и шатунных шеек составляет 80 мм. Согласно [4] напряженность на поверхности шеек 25 А/см, количество витков кабеля на шейке – 12, длина шейки составляет 120 мм.

Решение

1 Определим удлинение детали:

$$\frac{\ell}{d} = \frac{120}{80} = 1,5 < 4.$$

2 Определим Ампер·витки:

$$n \cdot I = \frac{45000}{15} = 30000 \text{ Ампер} \cdot \text{витки.}$$

3 Определим ток в катушке:

$$I = \frac{n \cdot I}{n} = \frac{30000}{12} = 2500 \text{ А.}$$

Пример 3.24. Определить силу тока при контроле шейки оси РУ – 1, диаметром 130 мм с использованием дефектоскопа МД-12ПШ. Способ контроля – СПШ. Условный уровень чувствительности А. Соленоид длиной $\ell = 120$ мм имеет 100 витков.

Решение. Согласно [4] напряженность на поверхности шейки 25 А/см.

$$H = \frac{W \cdot I}{\ell}. \quad (3.26)$$

Тогда

$$I = \frac{H \cdot \ell}{W} = \frac{25 \cdot 120}{100} = 30 \text{ А.}$$

3.3 Расчет параметров акустических пьезоэлектрических преобразователей

Ультразвуковая дефектоскопия как средство обнаружения дефектов в изделиях базируется на свойствах ультразвука – проникновении в различные среды и отражении ультразвуковых волн от границы раздела сред.

В практике ультразвукового контроля чаще других используются пьезоэлектрические контактные преобразователи (ПЭП), действие которых основано на прямом и обратном пьезоэффектах. Активным элементом ПЭП является пьезопластина, изготавливаемая из природных монокристаллов кварца, сегнетовой соли, турмалина или из искусственных пьезокерамических материалов (титаната бария, цирконата – титаната свинца и др.). На плоские поверхности пластин наносят тонкий слой серебра (электрод), основным назначением которого является увеличение срока службы пьезоэлемента за счёт более равномерного распределения звукового давления на его поверхности и повышения механической прочности пьезопластины. Керамические пьезопластины приобретают пьезосвойства только после поляризации, при которой случайно ориентированные векторы электрической поляризации элементарных частиц – доменов поворачиваются в направлении электрического поля. Пьезоэлектрические свойства сохраняются до температуры, называемый точкой Кюри. При температуре выше точки Кюри пьезосвойства материала пропадают.

Электроакустические преобразователи предназначены для возбуждения и приема упругих волн, а также трансформирования электрической энергии в механические колебания и обратно. Для генерации акустических колебаний в электроакустических преобразователях используются ряд физических эффек-

тов: пьезоэлектрический, электромагнитоакустический, электроёмкостный, лазерный, магнитострикционный и другие.

Пример 3.25. Определить толщину пьезопластины из пьезокерамики ЦТС-19, если скорость ультразвуковой волны в материале пьезоэлемента $C = 3300$ м/с, а частота f изменяется следующим образом: 6500 КГц, 1,25 МГц, 2,5 МГц, 5 МГц, 10 МГц.

Решение. Из формулы находим

$$h = \frac{c}{2f}, \quad (3.27)$$

Результаты расчета толщины пьезопластины в зависимости от частоты представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Расчет толщины пьезоэлемента при различных частотах

Частота f , МГц	Толщина пьезопластины h , мм
650 КГц	2,54
1,25 МГц	1,32
2,5 МГц	0,66
5,0 МГц	0,33
10,0 МГц	0,165

Пример 3.26. Рассчитать длину ближней зоны N прямого ПЭП с цилиндрическим излучателем на частоте $f = 2,5$ МГц, если диаметр пьезоэлемента $2a = 12$ мм. Материал ОК – сталь.

Решение. Рассчитаем длину – l – волны

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{5900 \cdot 1000}{2\,500\,000} = 2,36 \text{ мм.} \quad (3.28)$$

Тогда [3]

$$N = \frac{4 \cdot a^2 - 2,36^2}{4 \cdot 2,36} = 14,66 \text{ мм.}$$

В наклонном ПЭП упругие волны сначала распространяются в материале призмы, преломляются на границе призма-деталь, трансформируются в поперечные и попадают в контролируемое изделие. Ближняя зона либо полностью лежит в призме, либо частично входит в изделие.

Размер ближней зоны в изделии может быть вычислен по формуле

$$N = \frac{a^2 \cdot \cos \alpha}{\lambda \cdot \cos \beta} - r_{\Delta}, \quad (3.29)$$

где a – радиус пьезоэлемента, мм:

α – угол ввода ультразвукового пучка в объект контроля;
 β – угол падения (призмы) ультразвуковой волны;
 r_{Δ} – приведенный путь ультразвука в призме.

$$r_{\Delta} = r_1 \cdot \frac{c_1^{\text{пр}}}{c_t^{\text{изд}}} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}, \quad (3.30)$$

где r_1 – длина оси излучения в призме;

$c_1^{\text{пр}}$ – скорость продольных волн в призме;

$c_t^{\text{изд}}$ – скорость поперечных волн в изделии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 **Шелихов, Г.С.** Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов / Г.С. Шелихов ; под ред. В.Н. Лозовского. – М. : НТЦ «Эксперт», 1995.
- 2 **Горкунов, Э.С.** Магнитопорошковая дефектоскопия и магнитная структуроскопия / Э.С. Горкунов. – Екатеринбург : УрГУПС, 1999.
- 3 **Криворудченко, В.Ф.** Магнитный и ультразвуковой методы неразрушающего контроля деталей вагонов и других транспортных средств / В.Ф. Криворудченко. – Ростов н/Д : ФГБОУ ВПО РГУПС, 2008.
- 4 **Орлов, М.В.** Основы технической диагностики вагонов / М.В. Орлов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2003.
- 5 Неразрушающий контроль деталей вагонов. Общие положения / (РД 32.174-2001). – М., 2001.
- 6 Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля деталей вагонов / (РД 32.159.2000). – М., 2000.
- 7 Правила по неразрушающему контролю вагонов, их деталей и составных частей при ремонте. Общие положения / (ПР НК В.1-2012С). – СПб. : НИИ мостов и дефектоскопии, 2012.

Учебное издание

Криворудченко Виктор Федорович
Северина Людмила Геннадьевна

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Печатается в авторской редакции
Технический редактор Т.И. Исаева

Подписано в печать 19.06.15. Формат 60×84/16.
Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л. 1,86.
Тираж экз. Изд. № 5015. Заказ .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВПО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, 2.