

Неразрушающий Контроль и Диагностика

50 лет



Институт прикладной физики НАН РБ

ISSN 2224-1752



9 772224 175000

Электронная версия журнала
<http://science.by/nauka/13/>

№ 3 2013

Главный редактор

Мигун Николай Петрович

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА

Редакционная коллегия:

№ 3, 2013

Аскирко С.Д.
Боровский В.В.
Венгринович В.Л.
Войцехович Л.Н.
Горбаш В.Г.
Жагора Н.А.
Зуйков И.Е.
Ивлев С.А.
Кулагин В.Н.
Лухвич А.А.
Матюк В.Ф.
Мелешко А.Л.
Пантелеенко Ф.И.
Рудницкий В.А.
Сергеев С.С.

Научно-практический журнал

Электронная версия журнала
на сайте *science.by (nauka.of.by)*

Учредители

Белорусская ассоциация
неразрушающего контроля
и технической диагностики,
*республиканское общественное
объединение*

Институт прикладной физики
НАН Беларуси,
государственное научное учреждение

«Диатех»,
*республиканское научно-производственное
унитарное предприятие*

*Министерство информации Республики Беларусь 4 ноября 2011 г.
зарегистрировало журнал «Неразрушающий контроль и диагностика»
в Государственном реестре средств массовой информации за № 1488.*

*Журнал входит в «Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований».*

*Журнал НКД зарегистрирован в международном каталоге научных
журналов со свободным доступом к полным текстам.
DOAJ (Directory of Open Access Journals, <http://www.doaj.org>).*

Неразрушающий контроль и диагностика
(Электронная версия журнала: <http://science.by/nauka/13/>)

Научно-практический журнал

Издатели

*Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси»*

*Республиканское научно-производственное унитарное предприятие
«Диатех»*

Адрес редакции:
220072 г. Минск, ул. Академическая, 16, к. 314.
Тел.: +375 17 284 0686,
факс: +375 17 284 1740,
e-mail: diatech@tut.by
URL <http://science.by/nauka/13/>

Подписной индекс (ведомственная подписка) 00844.

Подписано в печать 19.09.2013.
Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Cambria.
Усл. печ. л. 8,60.
Тираж 100 экз.

Печать цифровая.
Государственное предприятие «Диатех»,
220072 г. Минск, ул. Академическая, 16.

Тексты публикуются в авторской версии без редакционных изменений.

ISSN 2224-1752 (печатная версия журнала).
ISSN 2224-5502 (электронная версия журнала).

© Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси», 2013

© Республиканское научно-производственное
унитарное предприятие «Диатех», 2013

20 ЛЕТ БЕЛОРУССКОЙ АССОЦИАЦИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Мигун Н.П.

директор Института прикладной физики НАН Беларуси,
председатель БАНК и ТД

Республиканское общественное объединение «Белорусская Ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики» (БАНК и ТД) объединяет инженерно-технических работников, ученых и специалистов, работающих в области НК и ТД и заинтересованных в развитии и популяризации этого направления. Оно было зарегистрировано в установленном порядке 15 сентября 1993 года в Министерстве юстиции Республики Беларусь. В течение 20 лет БАНК и ТД проводит работу, имеющую целью содействие повышению качества, надежности, долговечности и безопасности продукции, выпускаемой и эксплуатируемой в Республике Беларусь, привлечение научно-технического и кадрового потенциала Республики Беларусь для создания и внедрения новых методов и технических средств неразрушающего контроля и диагностики, обучение персонала.

Учредителями ассоциации выступили ведущие предприятия и организации, выполняющие работы по неразрушающему контролю, среди них ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», в котором 21 апреля 1993 г. и прошло учредительное собрание, а также РУП «Минский авиаремонтный завод», Центральная строительная лаборатория УП «Трест Белпромналадка», ОАО «Белтрубопроводстрой», Инженерный центр «Сертико» и УО «Белорусско-Российский университет».

В создании и дальнейшей деятельности Ассоциации трудно переоценить роль основных инициаторов и организаторов ее создания – З.С. Никифоровой, первого и неизменного председателя Ассоциации до 2006 года, а также С.А. Попоудиной, являвшейся исполнительным директором БАНК и ТД с 1995 по 2010 год. В значительной степени именно благодаря их опыту и активности Ассоциация получила широкое признание среди специалистов в области неразрушающего контроля как у нас в стране, так и за рубежом.

В соответствии с Уставом БАНК и ТД важнейшими направлениями ее деятельности являются:

- содействие в вопросах разработки, изготовления, приобретения, внедрения и сервисного обслуживания современных средств и методов неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД);

- информационное обслуживание членов БАНК и ТД, предприятий и организаций Республики Беларусь по НК и ТД посредством издания средств информации, проведения выставок, конференций и семинаров;
- организация конкурсов научных работ и практических разработок в области НК и ТД, выдвижение кандидатур на присуждение премий в этой области.

Подведем итог деятельности Ассоциации по всем этим направлениям. В области разработки новых методов и средств НК и ТД безусловным лидером в Беларуси и одним из признанных в мире научных центров является Институт прикладной физики НАН Беларуси.

Учеными коллектива ИПФ НАН Беларуси, в котором работает более 100 сотрудников, в том числе 14 докторов и 18 кандидатов наук, созданы десятки видов принципиально новых, защищенных авторскими свидетельствами и патентами ведущих стран мира средств неразрушающего контроля, а также информационно-измерительных систем диагностики машиностроительных, энергетических, нефтехимических и строительных комплексов.

Широко внедрены в промышленность портативные магнитные толщиномеры, твердомеры динамического действия, магнитошумовые анализаторы структуры и напряжений, специализированные установки ультразвукового контроля качества сцепления, качества сварки, внутренних дефектов, наборы для люминесцентной и цветной дефектоскопии поверхностных дефектов, вихретоковые дефектоскопы, электромагнитные приборы контроля твердости и деформации, импульсные магнитные анализаторы и импульсные поточные контролеры структуры и механических свойств стального проката, приборы для измерения магнитных потерь и индукции в электротехнических сталях, приборы контроля межвитковых замыканий обмоток электрических машин и др. Разработки института используются на десятках предприятий Беларуси, стран ближнего и дальнего зарубежья. В последнее время особую актуальность и востребованность приобрели новейшие разработки института в области создания и внедрения «под ключ» автоматизированных систем мониторинга уникальных высотных и большепролетных строительных конструкций (культурно-спортивных комплексов «Минск-Арена», «Чижовка-Арена» и «Фристайл-Центр», высотного здания «Парус» Бизнес-Центра в г. Минске и др.).

Ведущие ученые института успешно представляют свои результаты фундаментальных и прикладных исследований, а также основанные на них уникальные разработки на всех без исключения Евро-

пейских и Всемирных конференциях по НК последних 30 лет.

Информационное обслуживание членов Ассоциации проводилось посредством издания сначала информационных бюллетеней (было издано 70 номеров), а с 2010 года – научно-практического журнала «Неразрушающий контроль и диагностика» (уже издано 13 номеров), а также путем проведения выставок, конференций и семинаров. Учредителями журнала, в котором регулярно приводится научно-техническая и рекламная информация о новейших разработках в области неразрушающего контроля и их практическом использовании, являются БАНК и ТД, Институт прикладной физики НАН Беларуси и РНПУП «Диатех». Электронная версия журнала размещается на сайте <http://science.by/> Белорусского электронного центра «Наука».

Трудно переоценить важность информационной деятельности в области НК и ТД для обеспечения как высокого качества промышленной продукции, так и надежности функционирования потенциально опасных, сложных технических объектов. Ключевую роль в информационной деятельности Ассоциации играет организация и проведение конференций, семинаров и конкурсов. За прошедшие 20 лет с участием БАНК и ТД были проведены две Международные конференции «Компьютерные методы и обратные задачи в НК и ТД» (г. Минск), четыре Международные научно-технические конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (г. Могилев), Республиканская научно-техническая конференция «Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики». В октябре 2013 года состоится Международная научно-техническая конференция «Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики», посвященная 50-летию Института прикладной физики НАН Беларуси. Кроме того, за весь период деятельности ассоциации было проведено около 80 семинаров по актуальным вопросам НК и ТД с одновременной демонстрацией приборов.

Начиная с 2007 года, были также проведены шесть Республиканских конкурсов «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь», целью которых было повышение уровня подготовки и обмен опытом специалистов в области НК.

С первого года своего существования БАНК и ТД активно работает в области сертификации персонала по различным методам неразрушающего контроля. В Республике Беларусь под научно-методическим руководством БАНК и ТД проводится работа по созданию единой системы подготовки и сертификации персонала НК в соответствии с европейским стандартом ЕН 473 «Квалификация и сер-

тификация персонала в области НК. Общие принципы». Орган по сертификации персонала «Профсертико», который Проматомнадзор МЧС РБ уполномочил проводить сертификацию персонала в области НК, был зарегистрирован в Европейской Федерации неразрушающего контроля (EFNDT).

С 2002 г. «Профсертико» вошел в структуру Белорусского государственного института повышения квалификации и переподготовки кадров (БГИПК) по стандартизации, метрологии и управлению качеством. Нотифицированный орган ЕС, представленный Исследовательским институтом сварки Словацкой Республики, провел в 2005 г. аудит указанного органа по сертификации персонала (ОСП), по результатам которого БГИПК по стандартизации, метрологии и управлению качеством был признан экзаменационным центром ОСП. Тем самым было подтверждено его право на проведение сертификации персонала по НК в соответствии требованиями директивы 97/23/ЕС «Безопасность оборудования, работающего под давлением». За период с 2004 г. по настоящее время в Республике Беларусь сертифицировано более 9000 специалистов по различным методам НК.

По представлению Ассоциацией ведущих белорусских специалистов в области международной сертификации персонала по НК Всемирный Комитет по неразрушающему контролю ICNDT наградил в 2008 году З.С. Никифорову, С.А. Попоудину, В.В. Левкович и С.И. Зинovieву премией Хаверкрофта «Признание выдающего вклада в международную сертификацию в области НК».

По инициативе НП РУП «БелГИСС» и БАНК и ТД в соответствии с решением Госстандарта Республики Беларусь при Институте прикладной физики НАН Беларуси создан технический комитет № 10 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». Основной задачей этого комитета является рассмотрение и выработка предложений, направленных на проведение единой научно-технической политики по стандартизации в области НК и ТД, а также разработка, согласование и подготовка к утверждению проектов государственных стандартов Республики Беларусь и других нормативных документов по стандартизации по закрепленной области деятельности ТК. В 2008 году по инициативе БАНК и ТД и при активном участии РУП «БелГИСС» был издан каталог ТНПА «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Деятельность Ассоциации в области международного сотрудничества характеризуется, прежде всего, работой в соответствии с двухсторонними договорами о сотрудничестве, заключенными между БАНК и ТД и национальными Обществами неразрушающего контроля

России, Германии Украины, Китая, Болгарии и других стран. Особенно плодотворно сотрудничество с Российским Обществом по неразрушающему контролю и технической диагностике.

Кроме того, проводится работа в рамках международных организаций в области НК и ТД. В декабре 1996 года в ходе проведения 14-й Всемирной конференции по НК в Дели БАНК и ТД была принята в члены Международного комитета по неразрушающему контролю (IC-NDT). В мае 1998 года в рамках мероприятий 7-й Европейской конференции по неразрушающему контролю (ECNDT) наша Ассоциация в составе 27 национальных Обществ по НК европейских стран выступила организатором-учредителем Европейской Федерации неразрушающего контроля.

Все усложняющиеся задачи по повышению качества промышленной продукции, надежности и безопасности функционирования технических объектов требуют дальнейшего совершенствования методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики. Применение традиционных методов, особенно по отдельности, уже не всегда эффективно, ряд новых задач не поддается решению стандартными методами. Функционирование в стране современных крупномасштабных объектов – крупных химических комбинатов и нефтеперерабатывающих производств, уникальных высотных и большепролетных строительных конструкций с возможным большим скоплением в них людей, а также строительство атомной электростанции наряду с очевидными экономическими выгодами может привести к негативным последствиям в случае выхода их из строя. Разумеется, нельзя отказаться от таких сооружений, но можно и нужно минимизировать вероятность происхождения аварий и катастроф, вызванных техническими причинами, путем использования методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики.

В связи с этим трудно переоценить значение многогранной деятельности всех предприятий, учреждений и других организаций, в том числе Белорусской Ассоциации неразрушающего контроля и технической диагностики, в деле решения как проблем повышения качества промышленной продукции, так и обеспечения безопасности функционирования потенциально опасных технических объектов.

Статья поступила в редакцию 18.07.2013

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ

Highly sensitive diagnostic technique for short-circuited turns detecting

И.И. Брановицкий, И.Т. Скурту
I.I. Branovitsky, I.T. Scurtu

В статье описывается метод диагностики витковых замыканий в обмотках тороидальных трансформаторов, позволяющий выявлять один виток на фоне нескольких тысяч исправных. Дается оценка чувствительности метода, а также рекомендации по применению на базе разработанного диагностического прибора.

This paper is about windings testing method for toroidal transformers (short-circuited turns finding). The method allows to detect single turn in winding with several thousand turns. The paper contains the estimate of method's sensitivity and application notes for device developed to realize testing procedures

Введение. Одной из наиболее часто встречающихся причин, вызывающих выход трансформаторов из строя, является повреждение изоляции обмоток, т.е. витковые замыкания. Независимо от того, в какой обмотке произошло замыкание, является ли оно межвитковым или межсроевым, трансформатор выходит из границ своего электрического и теплового режима работы. При этом в изоляции, от состояния которой сильно зависит срок службы изделия, накапливаются необратимые изменения, приводящие в дальнейшем к росту дополнительных потерь энергии и выходу трансформатора из строя.

Испытания изоляции обмоток являются регламентированными при контроле качества изготавливаемых трансформаторов. Наличие или отсутствие КЗ-витков определяется путем измерения нормируемой величины – тока холостого хода. Также осуществляется измерение этой, но уже ненормируемой величины при удвоенных частоте и напряжении (по отношению к номинальным) на первичной обмотке. В случаях, когда минимальный диаметр провода, используемого для намотки обмоток, превышает 0.3–0.5 мм, принципиальных сложностей при оценке качества изоляции вышеуказанными или другими известными методами обычно не возникает. В случае использования

провода диаметром около 0.1–0.15 мм, особенно при числе витков в первичной обмотке порядка нескольких тысяч, традиционный метод не позволяет отличить дефектную обмотку от исправной. И хотя для таких маломощных трансформаторов величина дополнительно теряемой рассеиваемой мощности невелика, нарушение теплового режима может привести к выходу из строя трансформатора за пределами предприятия-изготовителя уже, как правило, в составе другого изделия. В связи с этим, для маломощной трансформаторной номенклатуры необходимо использование более чувствительных методов контроля качества обмоток.

Такой метод был разработан в Институте прикладной физики НАН Беларуси и реализован в диагностическом приборе ТВ (тестер витковый). Данный прибор в 2012 году был внедрен на участке контроля качества трансформаторов ООО «Юджэн», г. Новополоцк (данное предприятие специализируется на производстве тороидальных трансформаторов).

Теоретические основы метода. Для рассмотрения физических принципов, заложенных в основу данного метода, рассмотрим распределение магнитной индукции по продольному (кольцевому) сечению витого тороидального магнитопровода из анизотропной электротехнической стали при увеличении частоты питающего напряжения.

Намотанные на общий магнитопровод один отдельный виток и обмотка из 4000-5000 витков такого же диаметра при фиксированной частоте имеют разное отношение активной и реактивной части импеданса (у единичного витка оно значительно больше). Вследствие этого, при увеличении частоты питающего напряжения и сохранении его амплитуды, относительное снижение тока в витках обмотки будет больше, чем в одном витке. Иными словами, происходит виртуальное увеличение отношения ампер-виток для отдельно взятого витка, что приводит к росту неоднородности распределения индукции по продольному сечению магнитопровода и может быть зафиксировано.

Фундаментальной и наиболее принципиальной характеристикой, отражающей возможность детектирования (с учетом доступной чувствительности и уровня шумов) одного короткозамкнутого витка на фоне многих исправных, является отношение

$$s = \frac{1}{w_{max}}, \quad (1)$$

где в w_{max} – максимальное количество витков среди обмоток данного трансформатора. С учетом вышесказанного, при повышении частоты питающего напряжения и сохранении его амплитуды происходит увеличение отношения (1) и его преобразование к виду:

$$s(\omega) = \frac{w_v(\omega)}{w_{max}}, \quad (2)$$

где, w_v – количество “создаваемых” повышением частоты виртуальных витков, ω – угловая частота питающего напряжения.

Зависимость (2) с ростом частоты (без учета вихревых токов в стальном магнитопроводе) асимптотически стремится к фиксированному значению, поскольку отношение импедансов обмотки и витка почти не меняется при значительном доминировании в обоих случаях реактивной составляющей импеданса. Это позволяет оценивать потенциал чувствительности метода (например, для ферритовых сердечников, где вихревые токи не играют заметной роли в полосе частот, включающей достаточную для оценки часть), а также выбирать диагностическую частоту для стальных сердечников в том диапазоне, где динамическая проницаемость [1] снижается медленнее, чем растет частота. Практически, отношение (2) заменяется отношением модулей импедансов обмотки к витку.

Моделирование. В отличие от метрологических постановок задач [2], в данном случае спиралевидность магнитопровода не требует дополнительного учета и для снижения вычислительных затрат может быть заменена концентрической структурой. При этом, поскольку направление легкого намагничивания стали не отклоняется от направления магнитного пути, допустимо решать задачу в изотропной постановке. Обоснованно использование симметрии, а также применение сплошной магнитопроводящей структуры для замены составного сечения сплошным. Такой подход оправдан вследствие стационарного характера исследуемых процессов – это значит, что уменьшение потока вследствие вихревых токов может быть учтено введением динамической проницаемости [1] для данной рабочей точки. При этом оценка зависимости динамической проницаемости от частоты может быть выполнена экспериментально путем оценки индуктивности на разных частотах.

Расчет распределения магнитной индукции при равномерном расположении обмотки по длине магнитопровода представляет собой

осесимметричную задачу, но, поскольку интересующее нас поле одного витка не формирует осесимметричной картины, оправданно использовать одну четвертую часть трехмерной структуры.

Выход на рабочую точку трансформатора (по индукции около 1.7 Тл на частоте 50 Гц) осуществляется добавлением в модель осевой токонесущей линии. В данном случае токонесущая линия, в силу осесимметричности создаваемого ею магнитного поля, эквивалентна тороидальной токонесущей поверхности, воспроизводящей первичную обмотку, подключенную к номинальному входному напряжению. Последовательность геометрических преобразований, применяемых в данной задаче, представлена на рисунке 1.

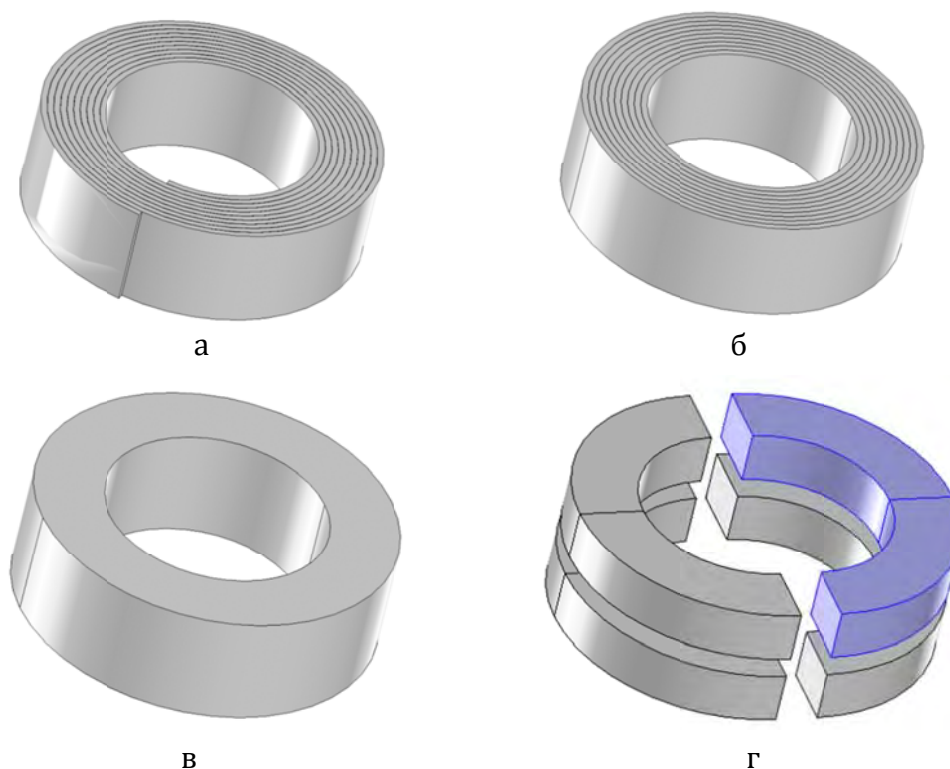


Рис. 1. Геометрические преобразования (последовательность а-б-в-г) для расчета распределения магнитной индукции в продольном сечении магнитопровода.

Пример расчета распределения средней по сечению магнитной индукции при наличии в обмотке одного короткозамкнутого витка представлен на рисунке 2 в виде развертки.

Расчеты выполнялись посредством метода конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics.

Как видно из рисунка 2, порядок варьирования неоднородностей в распределении магнитной индукции вследствие наличия одного короткозамкнутого витка составляет десятитысячные доли тесла. По этой причине гибкая локализованная измерительная обмотка включает в себя 50-100 витков для получения необходимого уровня информативного сигнала.

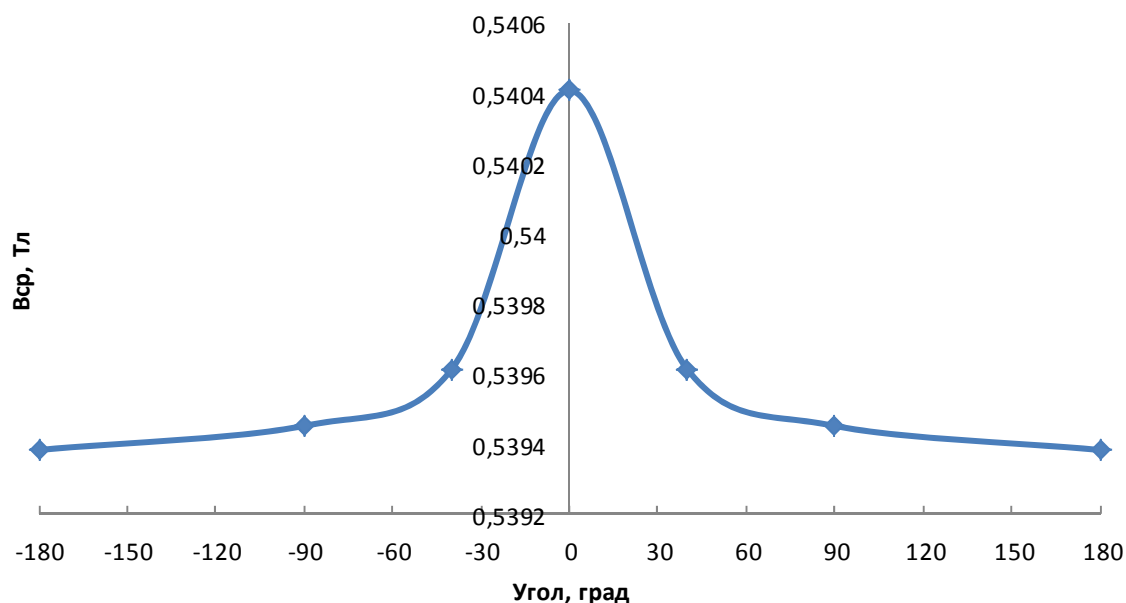


Рис. 2. Развертка распределения средней по сечению магнитопровода магнитной индукции.

Упомянутое ранее отношение импедансов обмотки и витка определялось расчетно-экспериментально, вследствие сильной нелинейности исследуемых процессов, и представлено на рисунке 3.

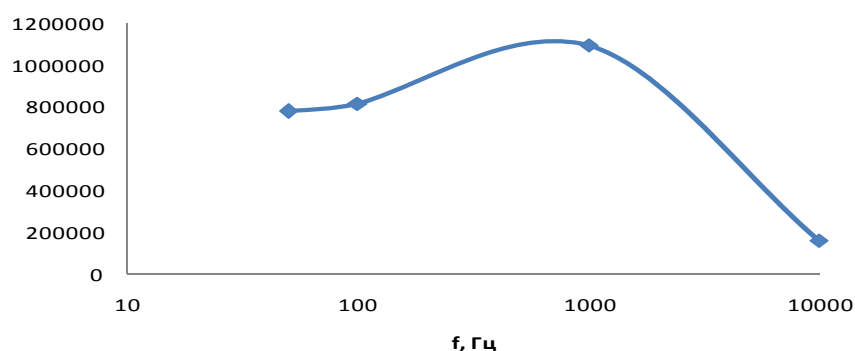


Рис. 3. Отношение импеданса намагничивающей обмотки к импедансу одного короткозамкнутого витка в зависимости от частоты.

В процессе экспериментальных исследований устойчивое детектирование одного короткозамкнутого витка (диаметр 0.1 мм) на фоне 4000 исправных фиксировалось с частоты около 300 Гц. Посредством зависимости, представленной на рисунке 3, можно сделать оценку чувствительности метода применительно к группе трансформаторов с данным минимальным диаметром катушки. Обозначая

$$k = \frac{|Z_{coil}|}{|Z_1|}, \quad (3)$$

где Z_{coil} и Z_1 соответствующие импедансы, имеем:

$$N_{max} = 4000 \cdot \ln \frac{k_{max}}{k_{300}}. \quad (4)$$

Здесь N_{max} – максимальное число витков в обмотке, на фоне которых можно выявить виток, k_{max} – максимальное значение, отношения (3), k_{300} – значение отношения (3) на частоте 300 Гц. Для указанного диаметра 0.1 мм оценка N_{max} составляет около 11000 витков.

Прибор ТВ. Общий вид диагностического прибора ТВ представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Общий вид диагностического прибора ТВ
1- электронный блок; 2 - гибкая измерительная катушка и контролируемый тороидальный трансформатор; 3 - ЭВМ.

Детектирование короткозамкнутых витков осуществляется с помощью гибкой измерительной обмотки, представляющей собой тороидально сосредоточенную спираль, состоящую из необходимого количества витков (определяется экспериментально с учетом электромагнитной обстановки в рабочих условиях). Измерительная обмотка в рабочем режиме представляет собой две встречно включенные катушки, в которых наводятся ЭДС, зависящие от локальных плотностей магнитного потока. Внешний вид гибкой измерительной обмотки и ее рабочая конфигурация представлены на рисунке 5.

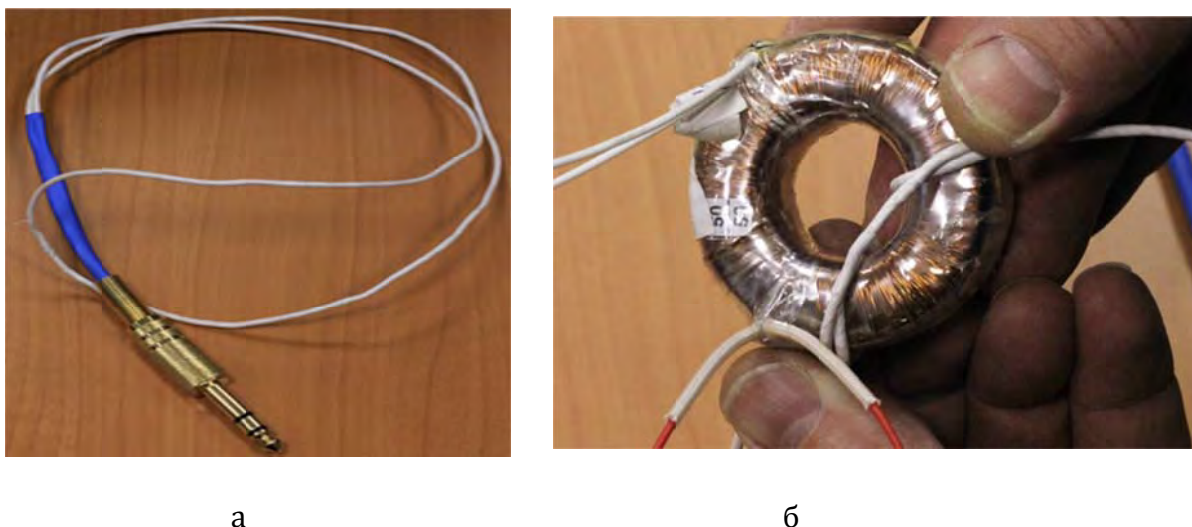


Рис. 5. Внешний вид гибкой измерительной обмотки (а) и ее рабочая конфигурация – положение на магнитопроводе в процессе контроля изделий (б).

Разностный сигнал, соответствующий исправному трансформатору, будет иметь уровень шума порядка единиц милливольт, но при наличии одного и более короткозамкнутых витков он увеличивается в разы.

Разностный сигнал, снимаемый с гибкой измерительной обмотки, сильно зависит от минимального диаметра провода, который используется для намотки. Этот признак может быть использован как группирующий при работе с большим количеством разнотипных трансформаторов, намотанных проводом одинакового диаметра.

Программное обеспечение прибора ТВ ориентировано на работу с базой данных трансформаторов.

Для добавления нового типа трансформатора необходимо протестировать прибором несколько (2-3) трансформаторов, прошедших испытания на годность по другим методикам. Для этих трансформаторов, принимаемых условно исправными, проводится для каждого по два испытания:

- с искусственно созданным КЗ-витком,
- без него.

При этом диаметр искусственно создаваемого КЗ-витка должен соответствовать минимальному диаметру провода, используемого при намотке. Одна часть гибкой измерительной обмотки должна в эксперименте располагаться максимально близко к искусственному КЗ-витку, а вторая расположена диаметрально противоположно. В качестве результатов обоих экспериментов записываются максимальные (амплитудные) значения разностного сигнала.

Результаты разных экспериментов для каждого из исследуемых трансформаторов должны отличаться как минимум в два раза (для диаметров провода порядка 0,3 мм и выше результаты могут отличаться в 10 и более раз), а сами значения результатов должны быть для каждого из трансформаторов сопоставимыми в границах допуска для разброса токов холостого хода. Если вышеуказанные условия значительно нарушаются, необходимо повторить опыты с КЗ-витками (возможно, КЗ-виток создан некачественно), либо, если это не меняет результат, выбрать другие трансформаторы.

Результаты экспериментов позволяют установить границы уровня критического сигнала (порог срабатывания):

- не менее полуторного уровня результата эксперимента без КЗ витка,
- не более 75 % от уровня результата эксперимента с КЗ-витком.

В случае необходимости тестирования единичного образца трансформатора нового типа с проводом диаметра 0,1-0,112 мм следует принимать уровень критического сигнала равным 15 мВ. Также следует учитывать, что даже без подключения гибкой измерительной катушки к трансформатору она может обладать уровнем выходного шумового сигнала до 5-7 мВ. Типичное значение амплитуды разностного сигнала для исправного трансформатора с проводом вышеуказанного диаметра составляет около 9-12 мВ или ниже.

Достоверность тестирования напрямую зависит от позиционной разности обмоток, поэтому за время тестирования оператор-измеритель должен обеспечить позиционную разность как можно большим числом комбинаций. При наличии у трансформатора множества обмоток, затрудняющих позиционирование, тестирование может проводиться в несколько этапов, на каждом из которых обеспечивается новый позиционный диапазон. Вышеуказанное перемещение осуществляется в течение нескольких секунд присутствия напряжения на первичной обмотке. В это время в области вывода прикладываемой к

прибору управляющей программы осуществляется индикация осциллограмм разностного сигнала, а по окончании приложения напряжения фон графика подсвечивается зеленым или красным цветом, что соответствует исправному либо неисправному трансформатору соответственно.

Тестер витковый [3] позволяет диагностировать широкую номенклатуру трансформаторов за счет возможности перестройки частоты, использования различных измерительных обмоток и возможности ведения базы данных на ЭВМ.

Выводы

1. Разработанный высокочувствительный метод диагностики витковых замыканий позволяет выявлять короткозамкнутые витки в обмотках тороидальных трансформаторов малой мощности, превосходя по чувствительности другие методы, включая метод измерения тока холостого хода.

2. Чувствительность метода с увеличением рабочей (диагностической) частоты асимптотически стремится к постоянной величине для слабоэлектропроводящих сердечников и имеет экстремум в случае проводящих.

3. Результативность метода зависит от конфигурации гибкой локально-сосредоточенной измерительной обмотки, что позволяет добиваться максимальной чувствительности, перемещая данную обмотку вдоль магнитопровода.

Литература

1. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М., 1962. 544 с.
2. Скурту И.Т. Параметрическое представление магнитных характеристик в задачах моделирования //Известия Национальной академии наук Беларуси № 4 2012. Серия физико-технических наук, с. 111-118.
3. Устройство для обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках тороидальных трансформаторов : патент Республики Беларусь № 9492, МПК G 01R 31/06 (2006.01) / И.Т. Скурту, И.И. Брановицкий, Г.И. Размыслович; заявитель ГНУ Институт прикладной физики НАН Беларуси. – № u 20130133; заявл. 2013.02.12.

Статья поступила в редакцию 12.06.2013

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ *Measurement assurance of pulsed magnetic analyzers*

Матюк В.Ф.
Matyuk V.F.

Изложены принципы метрологического обеспечения приборов импульсного магнитного контроля структурного состояния изделий из ферромагнитных сталей. Рассмотрены конструктивные особенности и возможности мер для поверки импульсных магнитных анализаторов типа ИМА разных модификаций. Показано, что повышение точности приборов данного типа сдерживается отсутствием средств поверки соответствующей точности.

The principles of measurement assurance of pulsed magnetic testing instruments for the structural state of ferromagnetic steels are given. The design features and capabilities of standards for calibration of various modification-sof IMA type pulsed magnetic analyzers are discussed. It is shown that increasing the accuracy of the this type instruments is constrained by the lack of calibration means with appropriate accuracy.

Введение

Для неразрушающего контроля качества изделий из ферромагнитных сталей, подвергаемых для получения требуемых механических свойств соответствующей термической обработке, успешно применяются магнитные методы [1, 2]. Методика контроля изделий этими методами определена ГОСТ 30415-96 [3], действующим на территории стран СНГ.

Особенностью магнитных методов контроля является существенная зависимость их результатов от влияния ряда факторов (геометрия изделия, состояние его поверхности, разброс химического состава), мешающих измерению контролируемого параметра, что накладывает определенные ограничения на метрологическое обеспечение соответствующих приборов.

Среди методов магнитной структуроскопии наибольшее распространение на практике получили метод коэрцитиметрии и импульсный магнитный метод [1, 2].

В приборах, реализующих метод коэрцитиметрии (КИФМ, КИПФ-1 и др.), осуществляется локальное намагничивание и перемагничивание испытуемого изделия в замкнутой магнитной цепи с помощью приставного электромагнита с ферромагнитным сердечником, измерение феррозондом магнитного потока в этой цепи при перемагничивании и тока через обмотку электромагнита, который в момент равенства нулю магнитного потока пропорционален коэрцитивной силе изделий. Коэрцитиметры широко используются в машиностроении для контроля качества закалки и низкотемпературного отпуска изделий, а также в металлургии для контроля качества горячекатаных листов, труб, сортового и профильного проката сталей [1, 4].

Импульсный магнитный метод заключается в локальном намагничивании контролируемого изделия неоднородным импульсным магнитным полем накладного соленоида с постоянной или изменяющейся амплитудой в заданном или изменяющихся направлениях и измерении градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после окончания заданной серии импульсов или всего цикла намагничивания, по величине которых определяют механические свойства [1, 5, 6].

Метод применяется для контроля механических свойств листового и профильного проката, труб и другой продукции металлургического производства из низкоуглеродистых, среднеуглеродистых, низколегированных и некоторых высоколегированных и жаропрочных сталей, а также для контроля проведенной термообработки стальных изделий на предприятиях машиностроения и авиастроения.

Принципы построения и современная электронная база позволяют обеспечить высокие метрологические характеристики приборов магнитной структуроскопии. Однако аттестовать эти приборы с точностью лучше, чем 5 % весьма проблематично из-за отсутствия средств поверки соответствующей точности.

Ввиду разных информативных параметров и принципов измерения коэрцитиметрами и приборами импульсного магнитного контроля их метрологическое обеспечение существенно отличается.

Определение метрологических характеристик коэрцитиметров проводится по стандартным образцам коэрцитивной силы (комплект СОКС-1), внесенным в Госреестр Российской Федерации за № 2192-89 и аттестуемым Уральским НИИ метрологии, г. Екатеринбург, Россия [7].

Достоинством поверки приборов по стандартным образцам является практически полное соответствие режима поверки условиям

контроля, но только для данных образцов. Существенным ограничением широкого использования поверки магнитных структуроскопов по стандартным образцам является наличие необратимых изменений их свойств во времени и с изменением температуры, а также большое количество необходимых образцов [8].

Кроме того, точность аттестации стандартных образцов по коэрцитивной силе составляет 2,5 % и пока не просматривается технических решений по ее повышению.

В приборах импульсного магнитного контроля (импульсных магнитных анализаторах и структуроскопах типа ИМА, ИЛК и КИМ разных модификаций) процесс намагничивания осуществляется соленоидом без ферромагнитного сердечника, а информативным параметром является градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности. Величина этого информативного параметра зависит не только от контролируемых свойств образца, но и от его размеров, величины зазора между преобразователем и контролируемым изделием, отклонения оси преобразователя от перпендикуляра к плоскости изделия, а также от режима намагничивания (причем нелинейно). В связи с большой номенклатурой изделий, контролируемых импульсными магнитными анализаторами, диапазон измерения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности лежит в пределах от 200 до 10^5 А/м, причем этот градиент изменяется вдоль оси измерения нелинейно (примерно по экспоненциальному закону).

Поэтому изготовить необходимое количество стандартных образцов, воспроизводящих с точностью порядка 1,5–2 % для каждого режима намагничивания величину и распределение вдоль оси измерительного преобразователя градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности невозможно.

Выходом является аттестация приборов импульсного магнитного контроля отдельно по величине амплитуды импульсов магнитного поля и отдельно по градиенту магнитного поля, то есть отказ от использования стандартных образцов.

АТТЕСТАЦИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

При больших уровнях амплитуды намагничивающих импульсов на торце соленоида результаты контроля импульсным магнитным методом очень слабо зависят от ее колебаний, так как материал доводится до состояния технического насыщения. Поэтому аттеста-

цию по амплитуде в диапазоне полей 10^5 – 10^6 А/м можно проводить с помощью импульсных миллитесламетров, например, типа ТП2-2У, погрешность которых в данном диапазоне не превышает 2,7 %.

Но импульсные миллитесламетры обладают довольно низкой точностью в диапазоне 10^3 – 10^4 А/м (от 5,3 до 12,4 %) и их нельзя применять для аттестации амплитуды импульсов магнитного поля в этом диапазоне, так как даже небольшие вариации ее оказывают существенное влияние на результаты намагничивания и особенно перемагничивания контролируемых изделий.

Так как намагничивающие элементы приборов импульсного магнитного контроля не содержат ферромагнитного сердечника, то создаваемое ими магнитное поле будет строго пропорционально величине тока через них. Поэтому соленоид можно аттестовать с требуемой точностью по постоянному полю, в результате чего определяется коэффициент соленоида. Коэффициент соленоида по постоянному току может быть рассчитан аналитически по геометрии соленоида и числу его витков. Затем в рабочем режиме (режиме импульсного намагничивания) осциллографом или импульсным вольтметром измеряется амплитуда импульса напряжения на измерительном шунте, соединенном последовательно с соленоидом. Она будет пропорциональна амплитуде импульса тока через соленоид. По величине измеренной таким образом амплитуды импульса тока и определенному или рассчитанному ранее коэффициенту соленоида определяется амплитуда намагничивающих импульсов. Форму и длительность намагничивающих импульсов оценивают по изменению сигнала, снимаемого с измерительного шунта с помощью осциллографа.

АТТЕСТАЦИЯ ПО ГРАДИЕНТУ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В основу методики метрологической аттестации импульсных магнитных анализаторов по градиенту магнитного поля положен принцип моделирования поля остаточной намагниченности локального участка изделия с помощью специальных источников (мер) магнитного поля. Эти меры создают в своей рабочей области, в которую помещают преобразователь поверяемого прибора, магнитное поле, величина и распределение которого вдоль оси меры соответствуют величине и распределению поля от локально намагниченного участка изделия [9, 10].

В качестве мер для создания однородных магнитных полей в до-

статочного большого объеме используются соленоиды и катушки Гельмгольца, а для создания магнитных полей с постоянным градиентом – градиентные катушки Максвелла [11, 12].

Соленоиды применяются в качестве мер сравнительно сильных полей и представляют собой относительно длинные катушки.

Однослойный соленоид

Напряженность магнитного поля вдоль оси z однослойного соленоида радиусом a и длиной $2b$ с числом витков N , через который протекает ток I , определяется как [13]

$$H_z^{\text{од}} = \frac{IN}{4b} \left[\frac{b+z}{\sqrt{a^2 + (b+z)^2}} + \frac{b-z}{\sqrt{a^2 + (b-z)^2}} \right]. \quad (1)$$

Расчетное значение поля однослойного соленоида характеризуется высокой точностью (погрешность порядка 0,01–0,001 %). Однослойные соленоиды применяются для воспроизведения магнитных полей напряженностью до 10 кА/м.

Поле в центре однослойного соленоида ($z = 0$)

$$H_{0z}^{\text{од}} = \frac{IN}{2\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (2)$$

В случае длинного однослойного соленоида ($2b \gg a$) поле в центре и на торце можно представить соответственно как

$$H_{0z}^{\text{од}} = \frac{IN}{2b}, \quad H_b^{\text{од}} = \frac{IN}{4b}. \quad (3)$$

Степень однородности поля однослойного соленоида можно оценить по выражению

$$\begin{aligned} \delta^{\text{од}} &= 100 \frac{H_{0z}^{\text{од}} - H_z^{\text{од}}}{H_{0z}^{\text{од}}} = \\ &= 100 \left\{ 1 - \left[\frac{\beta_{\text{од}} + \xi_{\text{од}}}{\sqrt{1 + (\beta_{\text{од}} + \xi_{\text{од}})^2}} + \frac{\beta_{\text{од}} - \xi_{\text{од}}}{\sqrt{1 + (\beta_{\text{од}} - \xi_{\text{од}})^2}} \right] \right\}, \% \end{aligned} \quad (4)$$

где $\beta_{од} = b/a$, $\xi_{од} = z/a$.

На рис. 1, а и б представлены величины отклонения от однородности напряженности поля вдоль оси однослойного соленоида при разных значениях относительно длины $\beta_{од}$. Из них видно, что за счет увеличения длины однослойного соленоида можно добиться требуемой однородности поля в заданной области.

Многослойный соленоид

Магнитное поле вдоль оси z многослойного соленоида длиной $2b$, состоящего из N_1 слоев по N_2 витков в каждом слое и имеющего внутренний радиус a_1 и внешний радиус a_2 , через который протекает ток I , равно [14]

$$H_z^{MH} = \frac{IN_1N_2}{4b(a_2 - a_1)} \times \left[(b+z) \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (b+z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (b+z)^2}} + (b-z) \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (b-z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (b-z)^2}} \right]. \quad (5)$$

Поле в центре многослойного соленоида ($z = 0$)

$$H_{0z}^{MH} = \frac{IN_1N_2}{2(a_2 - a_1)} \ln \frac{(a_2 + \sqrt{a_2^2 + b^2})}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + b^2}}, \quad (6)$$

а на торце ($z = b$).

$$H_b^{MH} = \frac{IN_1N_2}{2(a_2 - a_1)} \ln \frac{(a_2 + \sqrt{a_2^2 + 4b^2})}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4b^2}}. \quad (7)$$

В реальном соленоиде из-за наличия изоляции и неидеальной плотности намотки объем проводника меньше объема обмотки соленоида. Поэтому при расчете реального соленоида вводят коэффициент заполнения $\lambda = V_1/V$, где V_1 – объем проводника, V – объем обмотки соленоида.

В многослойных соленоидах можно получить магнитное поле

напряженностью порядка 100кА/м.

Степень однородности поля вдоль оси соленоида можно оценить по выражениям

$$\delta^{\text{MH}} = 100 \frac{H_{0z}^{\text{MH}} - H_z^{\text{MH}}}{H_{0z}} =$$

$$= 100 \left\{ 1 - \frac{(\beta + \xi) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (\beta + \xi)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\beta + \xi)^2}} + (\beta - \xi) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (\beta - \xi)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\beta - \xi)^2}}}{2 \ln \frac{(\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2})}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}}} \right\}, \%$$
(8)

где $\alpha = a_2/a_1$, $\beta = b/a_1$, $\xi = z/a_1$.

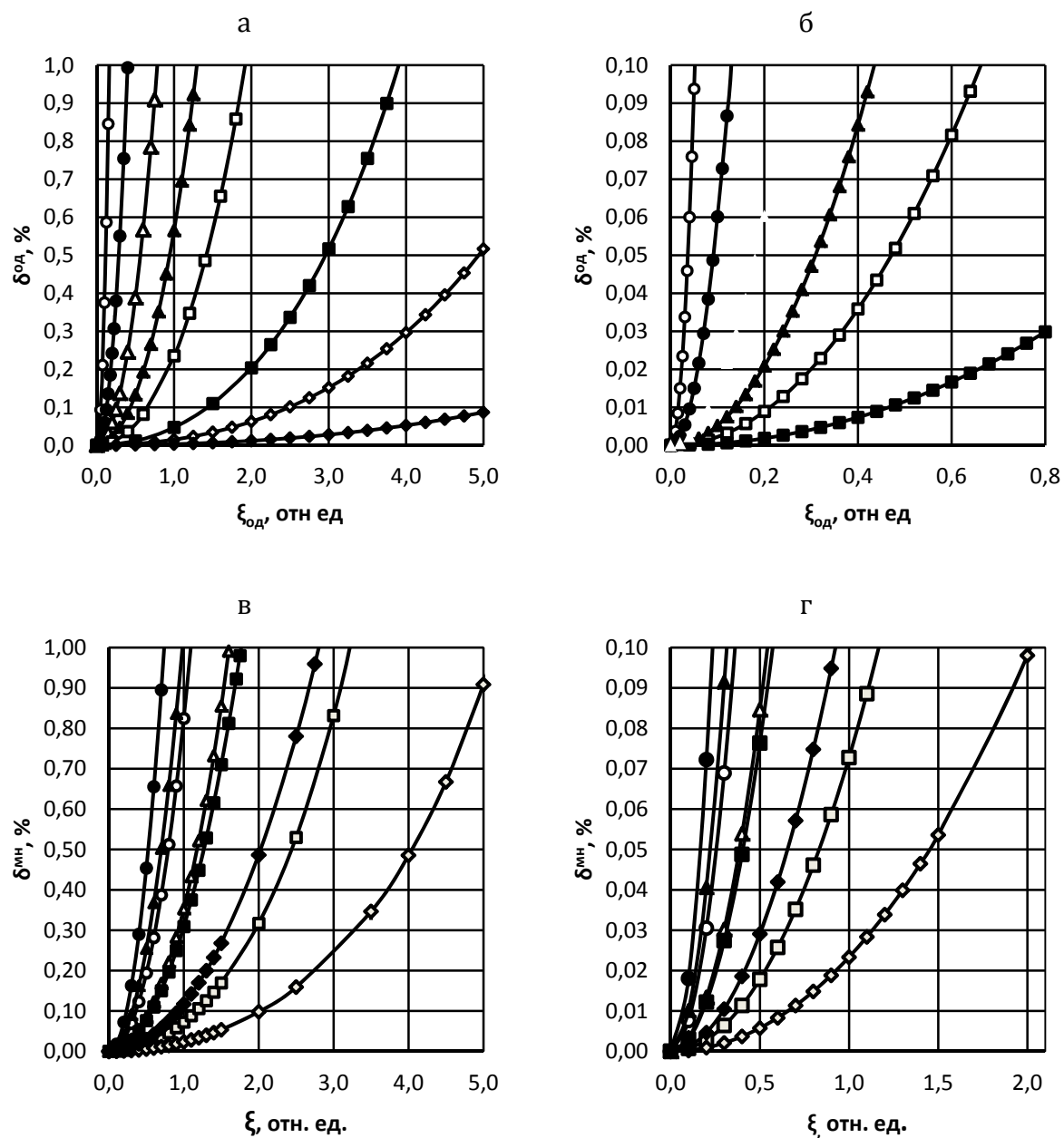
На рис. 1, в и г представлены величины отклонения от однородности напряженности магнитного поля вдоль оси многослойного соленоида при разных значениях относительных величин внешнего радиуса α и длины β . За счет увеличения длины соленоида можно добиться требуемой однородности магнитного поля в заданной области. Увеличение внешнего радиуса при постоянной длине уменьшает однородность магнитно поля многослойного соленоида.

Кольца Гельмгольца

Кольцами Гельмгольца называется система, состоящая из двух согласно включенных круговых контуров одинакового радиуса a_r с центрами на общей оси, расположенных параллельно друг другу на расстоянии $2h_r$, равном их радиусу [11, 12].

Если поместить начало координат в центре системы двух одинаковых согласно включенных контуров с током, то распределение напряженности поля вдоль оси этой системы может быть представлено как

$$H_z^r = \frac{I a_r^2}{2} \left\{ \frac{1}{[a_r^2 + (h_r + z)^2]^{3/2}} + \frac{1}{[a_r^2 + (h_r - z)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (9)$$



однослойный соленоид – а, б ($\beta_{од}$: $\circ$ – 1; $\bullet$ – 2; Δ – 3; $\blacktriangle$ – 4; $\square$ – 5; $\blacksquare$ – 7,5; $\diamond$ – 10; $\blacklozenge$ – 15)
 многослойный соленоид – в, г ($\circ$ – $\alpha = 1,5$; $\beta = 4$; $\bullet$ – $\alpha = 5$; $\beta = 4$; Δ – $\alpha = 1,5$; $\beta = 5$; $\blacktriangle$ – $\alpha = 5$; $\beta = 5$;
 $\square$ – $\alpha = 1,5$; $\beta = 7,5$; $\blacksquare$ – $\alpha = 5$; $\beta = 7,5$; $\diamond$ – $\alpha = 1,5$; $\beta = 10$; $\blacklozenge$ – $\alpha = 5$; $\beta = 10$)

Рис. 1. Отклонение от однородности напряженности поля вдоль оси соленоида

Выражение (9) можно привести к виду

$$H_z^\Gamma = \frac{Ia_\Gamma^2}{2(a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2)^{3/2}} \left\{ \left[1 + \frac{z(z + 2h_\Gamma)}{a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2} \right]^{-3/2} + \left[1 + \frac{z(z - 2h_\Gamma)}{a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2} \right]^{-3/2} \right\}. \quad (10)$$

Применив к выражению (10) формулу биномиального разложения относительно z , получим

$$H_z^\Gamma = \frac{Ia_\Gamma^2}{2(a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2)^{3/2}} \times \left[2 + \frac{15h_\Gamma^2 - 3(a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2)}{(a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2)^2} z^2 + \frac{15a_\Gamma^4 - 180a_\Gamma^2 h_\Gamma^2 + 120h_\Gamma^4}{4(a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2)^4} z^4 - \dots \right]. \quad (11)$$

Если $a_\Gamma = 2h_\Gamma$, то для точек, лежащих на оси z на расстояниях от центра системы, малых по сравнению с расстоянием между контурами, напряженность поля вдоль оси с точностью до членов четвертого порядка малости равна

$$H_z^\Gamma = \frac{8I}{5\sqrt{5}a_\Gamma} \left[1 - 1,152 \left(\frac{z}{a_\Gamma} \right)^4 \right]. \quad (12)$$

Кольца Гельмгольца являются классической системой для создания в некоторой области пространства однородного магнитного поля. Степень однородности вдоль оси z можно определить по выражению

$$\delta^\Gamma = 100 \frac{H_{0z}^\Gamma - H_z^\Gamma}{H_{0z}^\Gamma} = 115,2 \left(\frac{z}{a_\Gamma} \right)^4, \% \quad (13)$$

где H_{0z}^Γ – напряженность магнитного поля в центре системы

$$H_{0z}^\Gamma = \frac{8I}{5\sqrt{5}a_\Gamma}. \quad (14)$$

В табл. 1 приведены данные о распределении напряженности поля вдоль оси колец Гельмгольца.

Таблица 1. Распределение напряженности поля вдоль оси колец Гельмгольца

z/a_r	0	0,025	0,05	0,10	0,15	0,20
H_z^r/H_{0z}^r	1	0,9999996	0,999993	0,999885	0,999168	0,9981568
$\delta^r, \%$	0	0,000045	0,000720	0,0115520	0,058320	0,1843120
z/a_r	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45	0,50
H_z^r/H_{0z}^r	0,995500	0,9906688	0,9827128	0,9705088	0,957608	0,928
δ^r	0,45000	0,933120	1,728720	2,949120	4,723920	7,2

Реальные кольца (или катушки) Гельмгольца состоят из нескольких витков каждое. При этом толщина колец должна быть значительно меньше их среднего радиуса. Для уменьшения влияния размеров обмотки на однородность поля отношение длины кольца $2b_r$ к толщине намотки $\Delta a_r = a_{r2} - a_{r1}$ должно быть [15]

$$\frac{2b}{\Delta a_r} = \sqrt{\frac{31}{36}}, \quad (15)$$

где a_{r1} – внутренний, а a_{r2} – внешний радиусы обмотки.

Градиентные кольца Максвелла

Система, состоящая из двух встречно включенных круговых токов одинакового радиуса a_m , расположенных параллельно друг другу на расстоянии $2h_m = \sqrt{3}a_m$, с центрами на общей оси, называется градиентными кольцами Максвелла. Такая система создает вдоль оси z линейно изменяющееся поле, или поле с постоянным градиентом [12].

Если поместить начало координат в центре системы двух одинаковых и встречно включенных контуров с током, то распределение напряженности поля вдоль оси этой системы может быть представлено как

$$H_z^M = \frac{I a_m^2}{2} \left\{ -\frac{1}{[a_m^2 + (h_m + z)^2]^{3/2}} + \frac{1}{[a_m^2 + (h_m - z)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (16)$$

Выражение (16) можно привести к виду

$$H_z^M = \frac{I a_M^2}{2(a_M^2 + h_M^2)^{3/2}} \left\{ - \left[1 + \frac{z(z + 2h_M)}{a_M^2 + h_M^2} \right]^{-3/2} + \left[1 + \frac{z(z - 2h_M)}{a_M^2 + h_M^2} \right]^{-3/2} \right\}. \quad (17)$$

Применив к выражению (17) формулу биномиального разложения относительно z , получим

$$H_z^M = \frac{3I a_M^2 h_M}{(a_M^2 + h_M^2)^{5/2}} \times \left[z - \frac{5(3a_M^2 - 4h_M^2)}{6(a_M^2 + h_M^2)^2} z^3 + \frac{35a_M^4 - 140a_M^2 h_M^2 + 56h_M^4}{8(a_M^2 + h_M^2)^4} z^5 - \dots \right]. \quad (18)$$

Проведя дифференцирование по z , получим

$$\nabla H_z^M = \frac{\partial H_z^M}{\partial z} = \frac{3I a_M^2 h_M}{(a_M^2 + h_M^2)^{5/2}} \times \left[1 - \frac{5(3a_M^2 - 4h_M^2)}{2(a_M^2 + h_M^2)^2} z^2 + \frac{175a_M^4 - 700a_M^2 h_M^2 + 280h_M^4}{8(a_M^2 + h_M^2)^4} z^4 - \dots \right]. \quad (19)$$

Если $2h_M = \sqrt{3}a_M$, то для точек, лежащих на оси z на расстояниях от центра системы, малых по сравнению с расстоянием между контурами, с точностью до членов четвертого порядка малости

$$\nabla H_z^M = \frac{48}{49} \sqrt{\frac{3}{7}} \frac{I}{a_M^2} \left[1 - \frac{880}{343} \left(\frac{z}{a_M} \right)^4 \right]. \quad (20)$$

Градиентные кольца Максвелла являются классической системой для создания в некоторой области пространства магнитного поля с постоянным градиентом. Напряженность поля в центре такой системы равна нулю, а в симметрично расположенных относительно центра точках имеет одинаковую величину, но разную направленность. Степень постоянства градиента напряженности магнитного поля вдоль оси z можно определить по выражению

$$\delta^M = 100 \frac{\nabla H_{0z}^M - \nabla H_z^M}{\nabla H_{0z}^M} = \frac{88000}{343} \left(\frac{z}{a_M} \right)^4, \% \quad (21)$$

где ∇H_{0z}^M – градиент напряженности магнитного поля в центре системы

$$\nabla H_{0z}^M = \frac{48}{49} \sqrt{\frac{3}{7}} \frac{I}{a_M^2}. \quad (22)$$

В табл. 2 приведены данные о распределении градиента напряженности магнитного поля вдоль оси градиентных колец Максвелла.

Таблица 2. Распределение градиента напряженности поля вдоль оси градиентных колец Максвелла

z/a_M	0	0,025	0,05	0,10	0,15	0,20
$\nabla H_z^M / \nabla H_{0z}^M$	1	0,999999	0,999984	0,999743	0,998	0,995895
$\delta^M, \%$	0	0,0001	0,001603	0,0257	0,129883	0,4105
z/a_M	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45	0,50
$\nabla H_z^M / \nabla H_{0z}^M$	0,989987	0,979219	0,9615	0,934321	0,894794	0,83965
$\delta^M, \%$	1,002187	2,9781	3,85	6,5679	10,52055	16,035

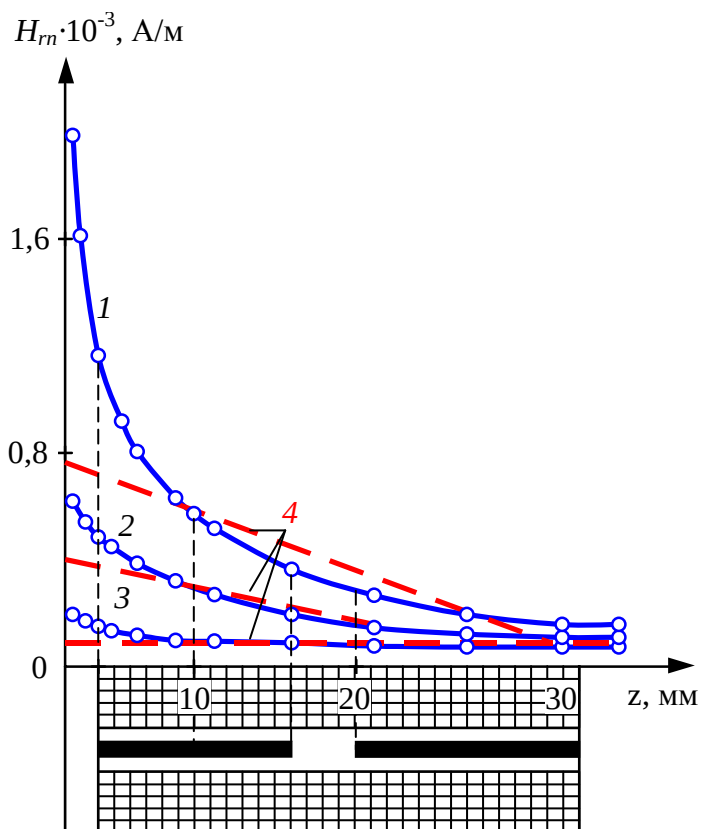
Реальные кольца (или катушки) Максвелла состоят из нескольких витков каждое. При этом толщина колец должна быть значительно меньше их среднего радиуса. Для уменьшения влияния размеров обмотки на однородность поля отношение длины кольца $2b_r$ к толщине намотки $\Delta a_M = a_{M2} - a_{M1}$ должно быть

$$\frac{2b_M}{\Delta a_M} = \sqrt{\frac{37}{44}}, \quad (23)$$

где a_{M1} – внутренний, а a_{M2} – внешний радиусы обмотки.

Меры градиента магнитного поля типа МГП

В основу построения мер для аттестации импульсных магнитных анализаторов положено распределение поля остаточной намагниченности над поверхностью



$T_{отж}$, °C: 1 – 100, 2 – 560, 3 – 800; 4 – поле в мере

Рис. 2. Распределение напряженности поля остаточной намагниченности вдоль оси преобразователя [9]

над поверхностью контролируемого изделия вдоль оси, на которой при контроле располагается магниточувствительный элемент (феррозонд-градиентометр) поверяемого прибора. Такое распределение для трех образцов низкоуглеродистой стали 08Ю размером $200 \times 200 \times 1$ мм³, отожженных при температурах 100, 560 и 800 °C соответственно и намагниченных десятью импульсами прибора ИМА-2А, представлено на рис. 2 [9]. Это распределение носит существенно нелинейный характер (близкий к экспоненте). Точное его моделирование является, с одной стороны, весьма сложной, а с другой – нецелесообразной задачей, так как распределение поля зависит от многих факторов, в том числе и от

магнитных свойств материала контролируемого изделия, его размеров и формы. Кроме того, нелинейное распределение магнитного поля трудно аттестовать. Поэтому для аттестации приборов импульсного магнитного контроля по градиенту магнитного поля целесообразно использовать источник, формирующий в области расположения магниточувствительного элемента преобразователя магнитное поле с постоянным градиентом, причем величина этого поля должна быть близкой к величине реального поля, действующего на этот элемент при контроле изделия. Причем рабочая область такой меры должна быть не менее длины магниточувствительного элемента преобразо-

вателя (в случае аттестации приборов типа ИМА – феррозонда длиной 30 мм).

Анализ распределения поля, представленного на рис. 2, показывает, что наиболее близким линейным приближением к реальному распределению поля над поверхностью испытуемого изделия является прямая, которая пересекается с экспериментальной в точке расположения середины полузонда, находящегося в большем поле, и проходит через нуль на границе рабочей области.

В [9] в качестве меры, формирующей в рабочей области поле одной полярности, которое уменьшается по абсолютной величине с постоянным градиентом от одного края рабочей области к другому, предложена система, состоящая из градиентных колец Максвелла и соосного с ними многослойного соленоида (рис. 3, а).

Градиентные кольца Максвелла создают в рабочей области меры магнитное поле с одинаковым вдоль этой области градиентом $\nabla H_M = k_M I_M$, а соленоид – однородное поле $H_C = k_C I_C$, где k_M – постоянная меры по градиенту, k_C – постоянная меры по полю, I_M – ток через градиентные кольца Максвелла, I_C – ток через соленоид.

Для выполнения условия линейного приближения моделируемого мерой магнитного поля к реальному необходимо, чтобы на границе рабочей области (на рис. 3, а вверху) поля, создаваемые градиентными кольцами Максвелла и соленоидом, были равны по абсолютной величине и противоположны по направлению (рис. 3, б).

$$\nabla H_M l = H_C, \quad (24)$$

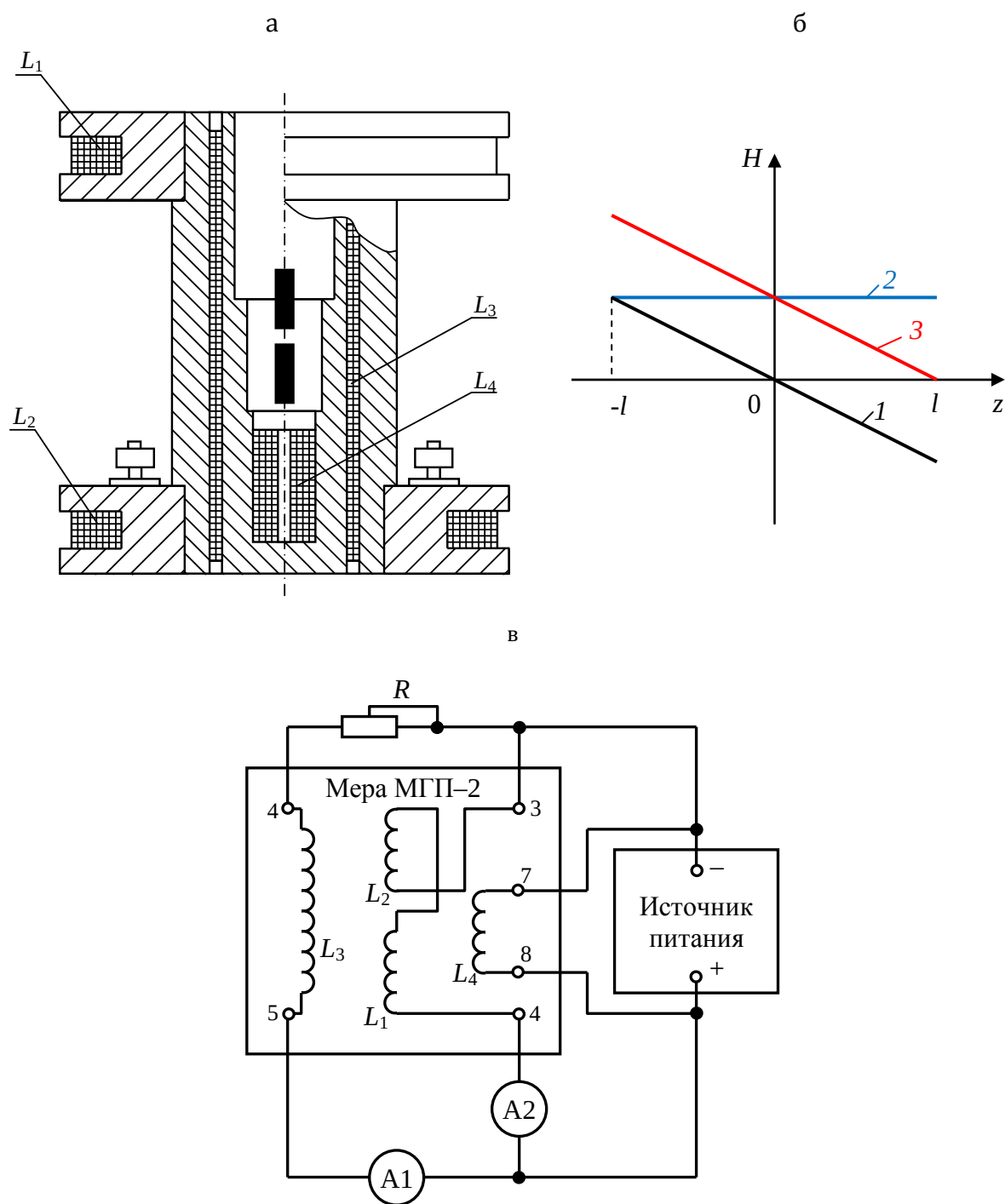
где l – расстояния от центра до границы рабочей области меры.

Отсюда

$$I_C = \frac{k_C}{k_M} I_M l. \quad (25)$$

Выполнение соотношения (25) обеспечивает равенство нулю поля на границе рабочей области меры, то есть работу полуэлементов феррозонда в полях только одного направления. Изменяя величину тока I_M , можно изменять величину градиента, создаваемого мерой магнитного поля. При этом необходимо изменять пропорционально величину тока I_C через соленоид. Так обеспечивается работа феррозонда преобразователя прибора в условиях, близких к его работе при измерении на изделии.

В приборах типа ИМА используется феррозонд длиной 30 мм [5, 6]. Исходя из этого и на основании соотношении $2h_M = \sqrt{3}a_M$ средний радиус кольца выбран 56 мм, а расстояние между кольцами – 96 мм.



а – конструкция меры;
 б – распределение поля: 1 – поле градиентных колец Максвелла, 2 – поле соленоида, 3 – суммарное поле
 в – схема соединения: L_1 , L_2 – градиентные кольца Максвелла, L_3 – соленоид, L_4 – дополнительный соленоид, R – резистор, A_1 и A_2 – амперметры

Рис. 3. Мера градиента магнитного поля МГП-2

При числе витков в каждом кольце, равном 320, расчетный коэффициент меры по градиенту магнитного поля равен $6,4 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$.

Схема соединения градиентных колец Максвелла и соленоида между собой и с источником питания представлена на рис. 3, в. При настройке или проверке преобразователь поверяемого средства устанавливается в рабочую область меры. Сначала резистором R устанавливается соотношение токов через градиентные кольца Максвелла и через соленоид L_3 . Затем, регулируя выходное напряжение источника питания, по показаниям амперметра A_2 устанавливают требуемую величину тока в рабочей области.

В мере также предусмотрена возможность регулировки положения феррозонда относительно торца преобразователя по результатам измерения градиента напряженности магнитного поля от дополнительного соленоида L_4 , расположенного соосно с другими элементами меры у нижнего торца рабочей области и представляющего собой копию намагничивающего соленоида преобразователя. Регулировка осуществляется перемещением феррозонда вдоль оси преобразователя перед клеей, спиливанием торца преобразователя или подклейкой к нему текстолитового диска нужной толщины.

В зависимости от типов поверяемых приборов импульсного магнитного контроля для их аттестации применяются меры градиента магнитного поля типа МГП разных модификаций (МГП-1, МГП-2, МГП-2А, МГП-5, МГП-5А и МГП-5Б). Меры отличаются размером рабочей области и диапазонами создаваемых ими магнитных полей (мера МГП-1 не имеет соленоида).

Технические характеристики мер типа МГП представлены в табл. 3, а их внешний вид – на рис. 4.

Нижний предел воспроизведения магнитного поля и его градиента определяется уровнем внешних помех. Питание мер типа МГП осуществляется от стандартных источников постоянного тока.

Для аттестации приборов типа ЭЛЛИПС [17] разработана поверочная установка УМОЭ [18], содержащая меру градиента магнитного поля МГПЭ и источник стабилизированного тока ЭБМУ. Ее отличительной особенностью является то, что однородное магнитное поле в ее рабочей области создается не соленоидом, а многослойными кольцами Гельмгольца.

Таблица 3. Технические характеристики мер градиента магнитного поля типа МГП

Тип меры	МГП-1	МГП-2	МГП-2А	МГП-3	МГП-5	МГП-5Б
тип поверяемых приборов	ИМА-2А, ИМА-4, ИЛК-2	ИМА-4, ИМА-4А	ИМА-4А	ТИМА	ИМА-5, ИМА-5А	ИМА-5А, ИМА-5Б, КИМ
диаметр рабочей области, мм	10	25	27	105	55	56
длина рабочей области, мм	30	30	30	40	30	30
диапазон воспроизведения градиента напряженности магнитного поля, А/м ²	0–6,4·10 ⁴	0–6·10 ⁴	0–1,3·10 ⁵	0–10 ⁵	0–10 ⁵	0–2·10 ⁵
диапазон воспроизведения напряженности магнитного поля, А/м	–	0–1,5·10 ³	0–2·10 ³	0–3·10 ³	0–4·10 ³	0–4·10 ³
погрешность определения постоянной меры по градиенту, %	–	1,5	1,5	1,5	1,5	1
погрешность определения постоянной меры по полю, %	–	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5
непостоянство градиента вдоль оси в рабочей области, %	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
неоднородность поля вдоль оси в рабочей области, %	–	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
масса, кг, не более	1,5	2	4	10	3	7
высота, мм, не более	120	130	140	190	125	160
диаметр, мм, не более	131	131	140	–	132	161
ширина×длина, мм ²	–			300×300	–	
параметры источника тока: диапазон регулировки напряжения, В	15	0–12	0–30	30	15	0–30
ток нагрузки, А	1	1	1	1	1,5	1
стабильность, %	0,05	1	0,5	0,5	0,5	0,5

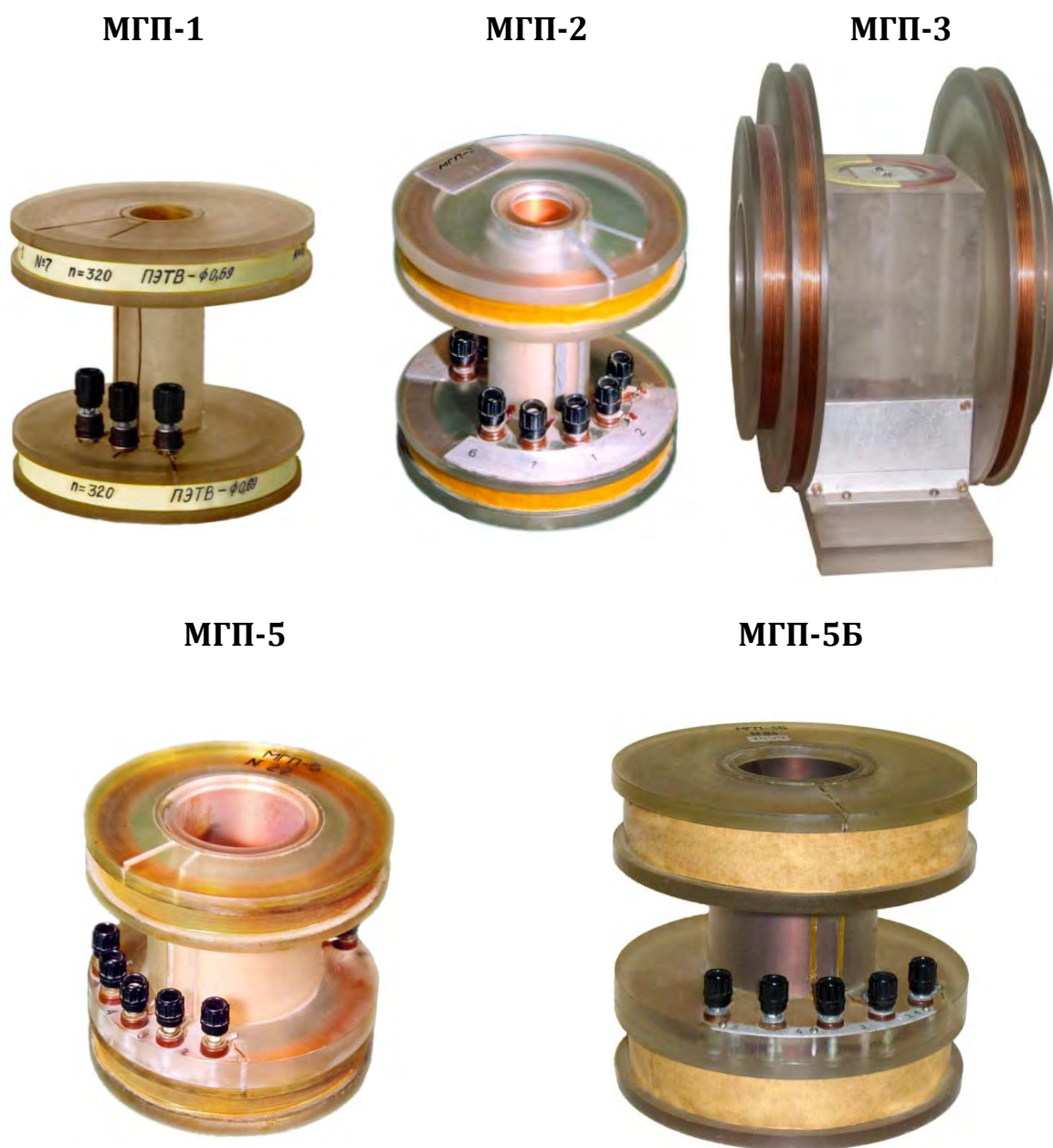


Рис. 4. Меры градиента магнитного поля типа МГП

Диапазон воспроизведения градиента магнитного поля мерой МГПЭ составляет $(0,1-99) \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$, а приведенная относительная погрешность не превышает 1,5 %. Неоднородность градиента вдоль оси рабочей области меры МГПЭ на расстоянии до 10 мм от ее центра и погрешность установки заданного тока не более 1,5 % каждая.

Меры типа МГП могут применяться для поверки, настройки и регулировки других типов магнитоизмерительных приборов, исполь-

зующих в качестве магниточувствительного элемента феррозонд или преобразователь Холла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте прикладной физики НАН Беларуси по заданию ГНТП "Стандарты" создан эталон магнитной индукции постоянного поля в диапазоне 0,5 – 2,0 Тл [19], на котором проводятся исследования и проверка приборов, использующих в качестве первичных преобразователей датчики Холла и датчики, работающие на явлении ядерного магнитного резонанса.

Однако разработанные также в Институте прикладной физики меры типа МГП проходят метрологическую аттестацию в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург), так как в Республике Беларусь образцовых средств измерений в создаваемом этими мерами диапазоне полей не имеется.

Для аттестации приборов магнитной структуроскопии, использующих в качестве магниточувствительных элементов феррозонды, необходимо создание эталона слабых магнитных полей для передачи единицы магнитной индукции в диапазоне 10^{-4} – $2 \cdot 10^{-2}$ Тл с погрешностью воспроизведения 0,1–0,05 % и единицы градиента магнитной индукции в диапазоне 10^{-3} – $2 \cdot 10^{-1}$ Тл/м с погрешностью воспроизведения 1,0 – 0,5 %. Кроме того, для передачи этих величин соответствующим рабочим мерам необходимы измерители индукции магнитного поля и ее градиента более высокого класса точности.

Среди мер типа МГП в настоящее время наиболее востребована мера МГП-5Б. По результатам метрологической аттестации основная погрешность постоянной по градиенту магнитного поля в центре меры составляет 1 %, а по постоянной магнитной индукции – 0,5 %. Относительные изменения постоянной меры по градиенту не превышают 1 % в сфере диаметром 20 мм и 2 % в сфере диаметром 30 мм. Относительные изменения постоянной меры по магнитной индукции не превышают 0,5 % в сфере диаметром 20 мм и 1,5 % в сфере диаметром 30 мм. Межповерочный интервал меры составляет два года.

Литература

1. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
2. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
3. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом: ГОСТ 30415-96. – Введ. 01.01.1998. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 16 с.
4. Матюк В.Ф., Кулагин В.Н. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2010, № 3, с. 4–14.
5. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 2, с. 29–64.
6. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального импульсного двухполярного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 4, с. 20–45.
7. Комплект стандартных образцов коэрцитивной силы СОКС-1. – Дефектоскопия, 1991, № 4, с. 96.
8. Испытание магнитных материалов и систем / Е.В. Комаров, А.Д. Покровский, В.Г. Сергеев, А.Я. Шихин; Под. Ред А.Я. Шихина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
9. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д. Метрологическое обеспечение импульсно-локального магнитного метода контроля. – В кн.: Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции. М: МДНТП, 1977, с. 130–135.
10. Matyuk V.F., Piunov V.D. Metrological support of devices for pulse magnetic testing of ferromagnetic articles. – In book: Achievements in Physics of Electromagnetic Nondestructive Testing. Proceedings of the Institute of Applied Physics of Academy of Sciences of Belarus. Minsk-Tokyo, 1994, p. 236–256.
11. Чернышев Е.Т., Чечурина Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.С. Магнитные измерения. – М.: Издательство стандартов, 1969. – 248 с.
12. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев, Е.Н. Чечурина, А.П. Щелкин. – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
13. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. – Екатеринбург: Ур О РАН, 1996. – 266 с.
14. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М.: Энергия, 1969. – 360 с.
15. McKeehan L.W. Combinations of circular currents for producing uniform magnetic field. – Review Scientific Instrumentation. 1936, Vol. 7, No. 3, p. 150–153.

16. McKeehan L.W. Combinations of circular currents for producing uniform magnetic field gradients. – Review Scientific Instrumentation. 1936, Vol. 7, No. 4, p. 178–179.
17. Испытания механических свойств сварных соединений магнитным методом с помощью прибора "Эллипс"/ В.Д. Пиунов, В.Б. Кратиров, В.Ф. Матюк, М.А. Мельгуй, А.А. Осипов, Л.С. Денисов, Е.Н. Орса. – В кн.: Сварка и родственные технологии. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск: БГНПК ПМ и НИКТИ СП с ОП, 1998, с. 93–96.
18. Матюк В.Ф., Пиунов В.Д. Установка УМОЭ для метрологического обеспечения приборов магнитного контроля механических свойств металла в зоне термического влияния сварки. – В кн.: Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. Материалы международной научно-технич. конф. Часть 2. Могилев, 20–21 апреля 2006 г. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2006, с. 153–154.
19. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пиунов В.Д., Пряхин А.Е. Метрологический комплекс для воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного тока. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз-тэхн. навук, 2005, № 2, с. 100–108.

Статья поступила в редакцию 08.08.13

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТОЧНЫХ КОНТРОЛЕРОВ

Measurement assurance of pulsed magnetic in-line checkers

Матюк В.Ф.

Matyuk V.F.

Изложены принципы метрологического обеспечения приборов импульсного магнитного контроля отжига листового проката ферромагнитных сталей в технологическом потоке производства. Рассмотрены конструктивные особенности и возможности мер для поверки импульсных магнитных поточных контролеров типа ИМПОК разных модификаций.

The principles of measurement assurance of pulsed magnetic instruments for testing flat ferromagnetic steels annealing in the technological line are given. The design features and capabilities of standards for calibration of various modifications of pulsed magnetic in-line checkers IMPOC type are discussed.

Введение

Разработанные в Институте прикладной физики НАН Беларуси меры градиента магнитного поля типа МГП успешно применяются для метрологической аттестации и поверки импульсных магнитных анализаторов типа ИМА [1]. Эти меры создают в рабочей области, куда помещают преобразователь поверяемого прибора, магнитное поле, величина и распределение которого вдоль оси меры соответствуют величине и распределению поля от локально намагниченного участка изделия [2, 3].

Особенностями импульсных магнитных поточных контролеров типа ИМПОК (далее установки ИМПОК) являются: разнесение в пространстве и во времени процессов намагничивания и измерения градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности; проведение намагничивания и измерения максимальных значений градиентов с двух сторон движущегося листового проката; осуществление контроля по усредненному значению (среднему арифметическому или среднему геометрическому) величин гра-

диентов, измеренных с двух сторон листа [4].

Меры типа МГП не моделируют распределение магнитного поля листа, локально намагниченного с двух сторон. Поэтому они не позволяют аттестовать установки ИМПОК без разборки преобразователя.

Кроме того, при аттестации установки ИМПОК необходимо моделировать изменение воздействия на феррозонды преобразователя поля локально намагниченного участка листа при разных скоростях его движения. Для этого необходимо сформировать в рабочих областях меры импульсы магнитного поля, частота, амплитуда и форма (во времени) которых была бы аналогичной частоте, амплитуде и форме импульсов магнитного поля от намагниченного участка контролируемого листа при его прохождении мимо феррозондов установки.

Аттестация по эталонным образцам установок ИМПОК неприемлема еще в большей степени, чем аттестация приборов типа ИМА, хотя для некоторых приборов, например коэрцитиметров, это, вероятно, пока единственно возможный способ метрологического обеспечения [1].

Во-первых, создание стандартных образцов требует единых технических условий и единой технологии изготовления, разработки и утверждения в установленном порядке методики их аттестации, а также внесения стандартных образцов в государственный реестр (иначе они не будут эталонными). Основным требованием к стандартным образцам для аттестации установок ИМПОК является то, что они должны при намагничивании установками этого типа формировать вдоль оси, перпендикулярной поверхности образца, локальное магнитное поле с градиентом, аттестованным с точностью не хуже 1,5 % (иначе они не обеспечат требуемую точность аттестации установки ИМПОК).

Во-вторых, аттестация по стандартным образцам обладает рядом недостатков, основными из которых является зависимость результатов измерения от геометрии, физико-механических свойств и химического состава стандартного образца, изменения этих свойств со временем, величины зазора между преобразователем и образцом и от других факторов. Следует также учитывать, что остаточная намагниченность тонкого листа быстро разрушается, что будет вносить в результаты аттестации дополнительную погрешность. Необходимо также обеспечить совмещение центра намагниченного участка стандартного образца и оси, вдоль которой будет при измерении расположен феррозонд аттестуемой установки. Для обеспечения калибровки установки ИМПОК на всех поддиапазонах измерения и проверки ли-

нейности показаний необходим очень большой набор эталонных образцов. Кроме того, с помощью эталонных образцов невозможно в принципе оценить работоспособность установки ИМПОК при изменении скорости движения листового проката.

Поэтому в основу метрологического обеспечения установок типа ИМПОК был положен наиболее перспективный путь, заключающийся в измерении амплитудных и временных параметров первичных полей, создаваемых аттестуемым средством, и моделировании вторичных полей объекта контроля и их измерении тем же средством. Преимуществом этого пути является удобная реализация, хорошая воспроизводимость и широкий диапазон создаваемых полей. Данная методика (МП. МН 1144-2002) утверждена Белорусским государственным институтом метрологии (БелГИМ) и признана Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации. Но, самое главное, она апробирована на протяжении нескольких десятков лет на металлургических заводах многих стран и до сих пор не возникало необходимости ее замены на аттестацию с использованием эталонных образцов.

АТТЕСТАЦИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

Амплитуда намагничивающих импульсов на торце каждого из соленоидов установок ИМПОК в зависимости от модификации составляет от $1,5 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^5$ А/м. Поэтому результаты контроля очень слабо зависят от ее колебаний в пределах $\pm 10\%$, так как при такой амплитуде импульсов локальный участок контролируемого листа доводится до состояния технического насыщения. С учетом этого обстоятельства аттестацию по амплитуде в диапазоне полей, формируемых установками ИМПОК, можно проводить с помощью импульсных миллитесламетров, например, типа ТП2-2У, погрешность которых в данном диапазоне не превышает $2,7\%$.

Так как намагничивающие элементы установок ИМПОК не содержат ферромагнитного сердечника, то создаваемое ими магнитное поле будет строго пропорционально величине тока через них. Поэтому соленоид этих установок, как и в случае приборов типа ИМА [1], можно аттестовать с требуемой точностью по постоянному полю, в результате чего определяется коэффициент соленоида.

Коэффициент соленоида по постоянному току может быть рассчитан аналитически по геометрии соленоида и числу его витков. За-

тем в рабочем режиме (режиме импульсного намагничивания) осциллографом или импульсным вольтметром измеряется амплитуда импульса напряжения на измерительном шунте, соединенном последовательно с соленоидом. Она будет пропорциональна амплитуде импульса тока через соленоид.

По величине измеренной таким образом амплитуды импульса тока и определенному или рассчитанному ранее коэффициенту соленоида определяется амплитуда намагничивающих импульсов. Форму и длительность намагничивающих импульсов оценивают по изменению сигнала, снимаемого с измерительного шунта с помощью осциллографа.

АТТЕСТАЦИЯ ПО ГРАДИЕНТУ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В основу методики метрологической аттестации установок ИМПОК по градиенту магнитного поля положен принцип моделирования поля локально намагниченного с двух сторон ферромагнитного листа с помощью двухзонной меры градиента магнитного поля типа МГПД.

На рис. 1, а представлена картина распределения нормальных составляющих напряженности поля остаточной намагниченности ферромагнитного листа вдоль нормали к поверхности после его локального намагничивания с двух сторон импульсным магнитным полем установки ИМПОК-1. Представленные поля направлены с разных сторон листа в противоположные стороны и с увеличением расстояния от его поверхности уменьшаются по абсолютной величине примерно по экспоненциальному закону.

Однако изготовление и метрологическая аттестация меры как источника магнитного поля с нелинейным законом его изменения в рабочей области при достаточной точности представляют большие трудности. Кроме того, на результатах аттестации поверяемого средства будет сказываться изменение положения его преобразователя в рабочей области.

Поэтому для метрологической аттестации установок типа ИМПОК необходимо создать источник магнитного поля, свободный от этих недостатков. Таким может быть источник, который формирует в областях расположения феррозондов (рабочих областях) магнитное поле с постоянным градиентом, причем величина и знак поля, воздействующего на соответствующий феррозонд, должны совпадать с величиной и знаком поля от намагниченного с двух сторон образца.

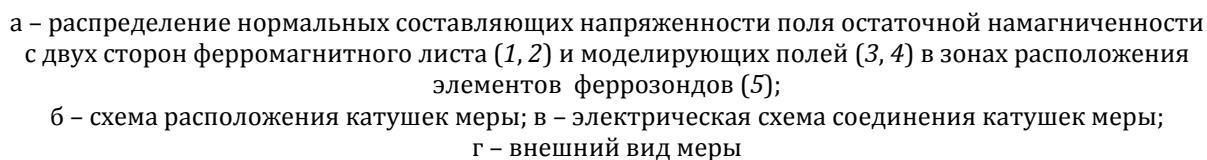


Рис. 1. Мера градиента магнитного поля МГПД

В качестве источника, удовлетворяющего указанным выше требованиям, предложена мера [5–12], состоящая из трех пар катушек: $L_1 - L_2$, $L_3 - L_4$, $L_5 - L_6$ (рис. 1, б) со средним радиусом a_1 для создания однородных полей противоположной полярности в рабочих областях I и II и трех пар катушек: $L_7 - L_8$, $L_9 - L_{10}$, $L_{11} - L_{12}$ со средним радиусом a_2 для создания в рабочих областях I и II полей с постоянным градиентом (все катушки системы соосны). Катушки в парах системы для создания однородных полей противоположных полярностей соединены между собой последовательно-встречно, а катушки соседних пар – последовательно-согласно. Катушки системы для создания полей с постоянным градиентом соединены между собой последовательно-встречно. Электрическая схема соединения катушек меры приведена на рис.1, в.

Расчет соотношения между радиусами катушек a_1 и a_2 , расстояниями $2h_1$ между парами катушек и h_2 между катушками в парах проведем для рабочей области I (рис. 1, б), так как в силу симметрии конструкции меры результаты для рабочей области II меры будут аналогичны. Будем также учитывать поле только двух пар катушек, расположенных симметрично по обе стороны рабочей области I, влиянием третьей пары из-за ее удаленности от соответствующей рабочей области пренебрегаем. Начало отсчета выберем в центре рабочей области I (точка 0) [5].

Поле на оси z кругового контура с током I можно представить в виде [13]

$$H(z) = \frac{I}{2a} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) F_{n+1}(\alpha) \left(\frac{z}{a}\right)^n, \quad (1)$$

где a – радиус кругового контура; $\alpha = z_0/a$; z_0 – расстояние от плоскости контура до начала координат (точка 0 на оси z); $F_{n+1}(\alpha)$ – коэффициенты разложения, причем

$$F_0(\alpha) = -\alpha(1 + \alpha^2)^{-1/2}, \quad (2)$$

$$F_1(\alpha) = (1 + \alpha^2)^{-3/2}, \quad (3)$$

$$F_n(\alpha) = \left(2 - \frac{1}{n}\right) \frac{\alpha}{1 + \alpha^2} F_{n-1}(\alpha) - \left(1 - \frac{1}{n-1}\right) \frac{1}{1 + \alpha^2} F_{n-2}(\alpha), \quad (4)$$

при $n = 2, 3, \dots$

$$F_0(-\alpha) = (-1)^{n+1}F_n(\alpha), \quad (5)$$

$$\frac{\partial F_n(\alpha)}{\partial \alpha} = (n+1)F_{n+1}(\alpha). \quad (6)$$

Для системы контуров ($L_1 - L_4$), создающих в рабочей области I однородное магнитное поле (с учетом согласного включения контуров в парах L_1, L_4 и L_2, L_3 , встречного включения контуров в парах L_1, L_2 и L_3, L_4 и выбора начала координат в центре рабочей области), суммарное поле можно представить в виде:

$$H_1(z) = \frac{I_1}{a_1} \sum_{n=1}^{\infty} (2n-1)[F_{2n-1}(\alpha_1) - F_{2n-1}(\alpha_2)] \left(\frac{z}{a_1}\right)^{2n-1}, \quad (7)$$

где

$$\alpha_1 = \frac{h_1}{a_1}, \quad \alpha_2 = \frac{h_1 + h_2}{a_1}. \quad (8)$$

Если

$$F_3(\alpha_1) - F_3(\alpha_2) = 0, \quad (9)$$

то магнитное поле $H_1(z)$ будет однородным с точностью до четвертого порядка величины z/a_1 .

Соотношение (9) может быть выполнено при условии

$$\frac{4h_1^2 - a_1^2}{(h_1^2 + a_1^2)^{7/2}} - \frac{4(h_1 + h_2)^2 - a_1^2}{[(h_1 + h_2)^2 + a_1^2]^{7/2}} = 0. \quad (10)$$

Суммарное поле системы контуров ($L_7 - L_{10}$), создающих в рабочей области I поле с постоянным градиентом (поле, линейно изменяющееся с изменением z), с учетом полярности их включения и расположения относительно начала координат примет вид

$$H_2(z) = \frac{I_2}{a_2} \sum_{n=1}^{\infty} 2n[F_{2n}(\alpha_3) - F_{2n}(\alpha_4)] \left(\frac{z}{a_2}\right)^{2n-1}, \quad (11)$$

где

$$\alpha_3 = \frac{h_1}{a_2}, \quad \alpha_4 = \frac{h_1 + h_2}{a_2}. \quad (12)$$

Напряженность поля $H_2(z)$ будет изменяться линейно вдоль оси z с точностью до пятого порядка величины z/a_2 , если

$$F_4(\alpha_3) - F_4(\alpha_4) = 0, \quad (13)$$

Соотношение (13) может быть выполнено при условии

$$\frac{4h_1^2 - a_2^2}{(h_1^2 + a_2^2)^{9/2}} - \frac{(h_1 + h_2)[4(h_1 + h_2)^2 - 3a_2^2]}{h_1[(h_1 + h_2)^2 + a_2^2]^{9/2}} = 0. \quad (14)$$

Решение уравнений (10) и (14) возможно лишь численными методами. На рис. 2, а представлены зависимости a_1/h_1 и a_2/h_1 как функции величины $(h_1 + h_2)/h_1$ (сплошные линии). Эти зависимости для практически используемых случаев (для параметров преобразователей установок типа ИМПОК) хорошо описываются следующими выражениями:

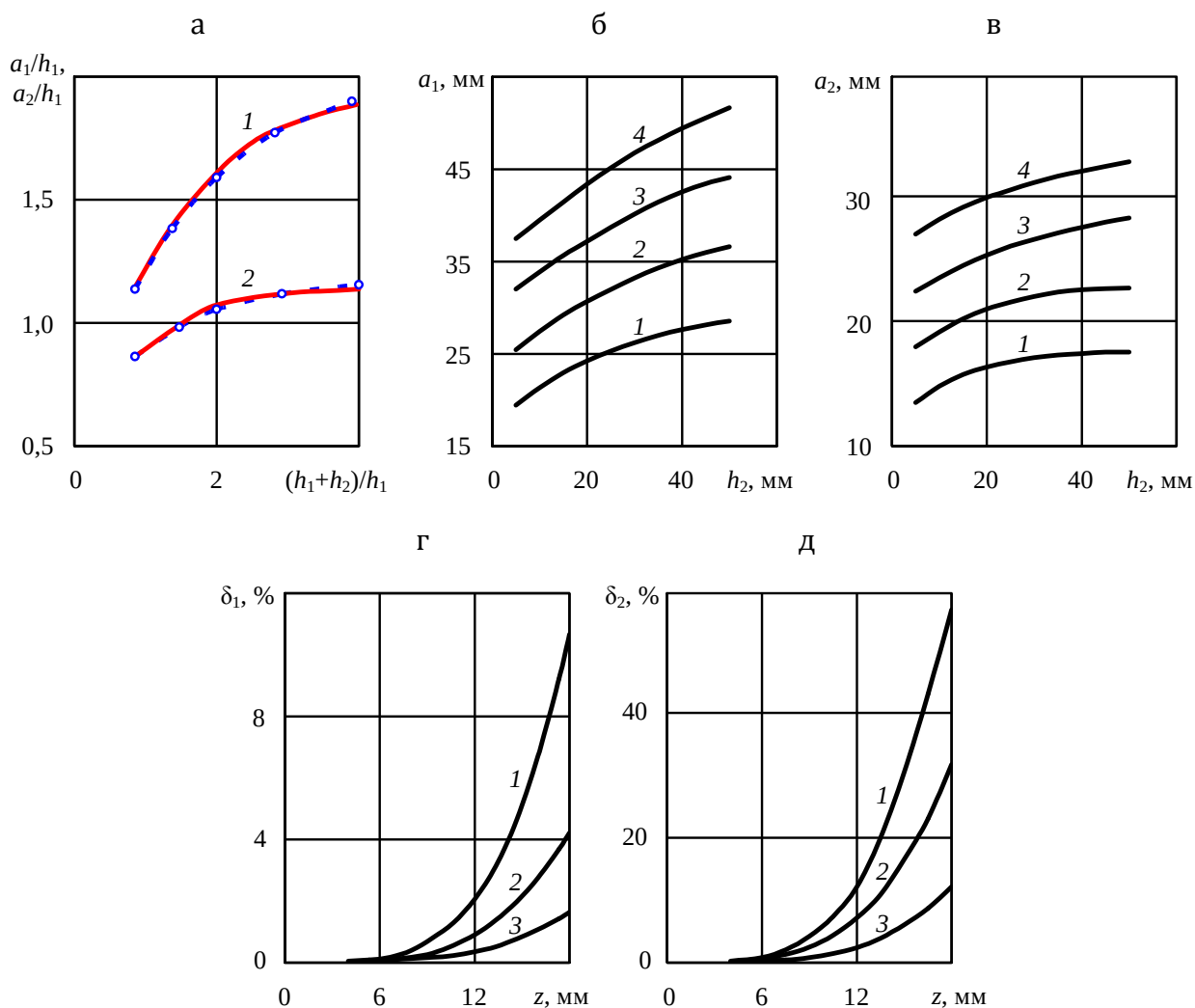
$$\frac{a_1}{h_1} = 0,004 + 1,415 \operatorname{arctg} \frac{h_1 + h_2}{h_1}, \quad (15)$$

$$\frac{a_2}{h_1} = 0,334 + 0,644 \operatorname{arctg} \frac{h_1 + h_2}{h_1}, \quad (16)$$

которые отражены на рис. 2, а штриховыми линиями.

Таким образом, при выполнении соотношения (15) контуры радиуса a_1 (катушки $L_1 - L_4$) создают в рабочей области I поле, однородное с точностью до членов четвертого порядка относительно z/a_1

$$H_1 = \frac{I_1}{a_1} \left\{ F_1 \left(\frac{h_1}{a_1} \right) - F_1 \left(\frac{h_1 + h_2}{a_1} \right) + 5 \left[F_5 \left(\frac{h_1}{a_1} \right) - F_5 \left(\frac{h_1 + h_2}{a_1} \right) \right] \frac{z^4}{a_1^4} \right\}, \quad (17)$$



а: 1 - a_1/h_1 ; 2 - a_2/h_1 ; б, в: 1 - $h_1 = 15$; 2 - 20; 3 - 25; 4 - 30 мм;
г, д: 1 - $h_1 = 30$, $h_2 = 10$; 2 - $h_1 = 30$, $h_2 = 30$; 3 - $h_1 = 40$, $h_2 = 30$ мм.

Рис. 2. К расчету меры МГПД

При выполнении соотношения (16) контуры радиуса a_2 (катушки $L_7 - L_{10}$) создают в той же области поле, градиент которого постоянен с точностью до членов четвертого порядка относительно z/a_2 :

$$\nabla H_2 = \frac{2I_2}{a_2^2} \left\{ F_2 \left(\frac{h_1}{a_2} \right) - F_2 \left(\frac{h_1 + h_2}{a_2} \right) + 15 \left[F_6 \left(\frac{h_1}{a_2} \right) - F_6 \left(\frac{h_1 + h_2}{a_2} \right) \right] \frac{z^4}{a_2^4} \right\}. \quad (18)$$

Тогда поле, создаваемое контурами радиуса a_1 , в центре рабочей области, отличается от поля на расстоянии z от центра (в %) на

$$\delta_1 = \frac{H_1(0) - H_1(z)}{H_1(0)} \cdot 100 = 500 \frac{\left[F_5\left(\frac{h_1 + h_2}{a_1}\right) - F_5\left(\frac{h_1}{a_1}\right) \right] z^4}{\left[F_1\left(\frac{h_1}{a_1}\right) - F_1\left(\frac{h_1 + h_2}{a_1}\right) \right] a_1^4}. \quad (19)$$

Градиент поля, создаваемый контурами радиуса a_2 в центре рабочей области, отличается от градиента поля на расстоянии z от центра (в %) на

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \frac{\nabla H_2(0) - \nabla H_2(z)}{\nabla H_2(0)} \cdot 100 = \\ &= 1500 \frac{\left[F_6\left(\frac{h_1 + h_2}{a_2}\right) - F_6\left(\frac{h_1}{a_2}\right) \right] z^4}{\left[F_2\left(\frac{h_1}{a_2}\right) - F_2\left(\frac{h_1 + h_2}{a_2}\right) \right] a_2^4}. \end{aligned} \quad (20)$$

На рис. 2, б приведены зависимости радиуса a_1 контуров, создающих в рабочей области однородное поле, а на рис. 2, в – зависимости радиуса a_2 контуров, создающих в рабочей области поле с постоянным градиентом, от расстояния между контурами в парах для ряда значений расстояния между парами катушек (это расстояние ограничивает величину рабочей области). Величины δ_1 и δ_2 в зависимости от z представлены на рис. 2, г и 2, д соответственно.

Реальные катушки меры имеют конечную длину p и толщину s обмоток. Погрешность, вызванную конечными размерами обмотки катушки, можно уменьшить, воспользовавшись соотношениями между p и s , полученными в [14, 15]

$$\frac{p_1}{s_1} = 0,928 \text{ (для } a_1), \quad \frac{p_2}{s_2} = 0,917 \text{ (для } a_2). \quad (21)$$

Длина рабочей области меры для поверки установок типа ИМПОК определяется длиной используемых феррозондов (30 мм), а расстояние h_2 между катушками в парах определяется зазором между преобразователями (50 мм). С учетом этого выбрано расстояние между катушками в парах $h_2 = 30$ мм (при длине обмотки $p = 10$ мм) и расстояние между парами катушек $2h_1 = 60$ мм (расстояние отсчитываем между плоскостями, проходящими через середину длины обмотки).

По соотношениям (15) и (16) определяются средние радиусы катушек: $a_1 = 46$ мм и $a_2 = 31$ мм. Обозначим N_1 и N_2 число витков катушек со средними радиусами a_1 и a_2 соответственно. Тогда для выбранных h_1 и h_2 и рассчитанных a_1 и a_2 получим

$$H_1 = k_1 N_1 I_1, \quad (22)$$

где $k_1 = 5$ м⁻¹;

$$\nabla H_2 = k_2 N_2 I_2, \quad (23)$$

где $k_2 = 533$ м⁻².

Точное значение коэффициентов k_1 и k_2 определяется экспериментально при аттестации меры.

Из рис. 1, а видно, что наиболее близкой линейной аппроксимацией реального распределения поля остаточной намагниченности листового ферромагнитного материала, воздействующего на феррозонды после локального двухстороннего намагничивания с учетом возможных смещений листа относительно последних, может служить прямая линия, которая пересекается с экспериментально снятой кривой в точке расположения середины полузонда при максимальном смещении листа и проходит через нуль на границе рабочей области (точки А и В на рис. 1, а). В отсутствие смещения расстояние от центра феррозонда до точки, где эта прямая проходит через нуль, обозначим через l . Тогда для создания моделирующего поля необходимо

$$H_1 = \nabla H_2 l. \quad (24)$$

Из (24) с учетом (22) и (23)

$$I_1 = l \frac{k_2 N_2}{k_1 N_1} I_2. \quad (25)$$

Соотношение (25) между токами I_1 и I_2 через соответствующие обмотки устанавливается резистором R_1 (рис. 1, в).

Конструкция меры МГПД (рис. 1, г) позволяет надвигать ее на преобразователи установки ИМПОК в зоне расположения феррозондов. При этом последние оказываются в рабочих областях меры. Меняя величину тока через обмотки меры, можно получить в ее рабочих

областях магнитные поля необходимой величины и конфигурации для метрологической аттестации установки ИМПОК.

Основные технические характеристики меры, с учетом аттестации во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (г. Санкт-Петербург), приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики меры градиента магнитного поля типа МГПД

Характеристика	Величина
тип поверяемых приборов	ИМПОК-1А, ИМПОК-1Б, ИМПОК-1БМ, ИМПОК-2, ИМПОК-3
количество рабочих областей	2
размер рабочей области, высота×диаметр, мм ²	30×55
максимальное значение градиента напряженности магнитного поля, А/м ²	$7 \cdot 10^4$
основная погрешность определения постоянной по градиенту магнитного поля в центре каждой из рабочих зон, %	1,0
максимальное значение напряженности однородного магнитного поля, А/м	$1,5 \cdot 10^2$
основная погрешность определения постоянной по напряженности однородного магнитного поля в центре рабочих зон, %	0,5
непостоянство градиента магнитного поля в рабочих областях меры на расстоянии $\pm 10\%$ по оси от центра, %, не более	2
неоднородность напряженности магнитного поля в рабочих областях меры на расстоянии $\pm 10\%$ по оси от центра, %, не более	1,5
потребляемая мощность, ВА, не более	30
мера рассчитана на подключение к ИМИТАТОРу (Ыт 5.189.866) при поверке установок типа ИМПОК, в остальных случаях – к стабилизированному источнику постоянного тока с диапазоном регулировки напряжения, В ток нагрузки, А	0–15 2,5
масса, кг, не более	5
размеры (высота×ширина×длина), мм ³ , не более	240×120×178
условия эксплуатации: температура окружающего воздуха, °С относительная влажность воздуха, % атмосферное давление, кПа	+10 до +35 30 до 80 от 86 до 106,7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛОКАЛЬНО НАМАГНИЧЕННОГО УЧАСТКА ЛИСТА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ НА МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОВЕРЯЕМОГО СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ

Описанные выше меры градиента магнитного поля типа МГПД моделируют в линейном приближении распределение поля остаточной намагниченности вдоль оси, проходящей через центр локально с двух сторон намагниченного участка контролируемого изделия. Для обеспечения достаточной точности калибровки и поверки установок импульсного магнитного контроля листового проката сталей, движущегося в потоке производства, (установок типа ИМПОК) необходимо учитывать распределение поля остаточной намагниченности вдоль намагниченного участка контролируемого листа и его воздействие на магниточувствительные элементы поверяемого средства при различных скоростях движения объекта контроля. Для этого необходимо сформировать в рабочих областях меры импульсы магнитного поля, частота, амплитуда и форма (во времени) которых была бы аналогичной частоте, амплитуде и форме импульсов магнитного поля от намагниченного участка контролируемого листа при его прохождении мимо магниточувствительных элементов.

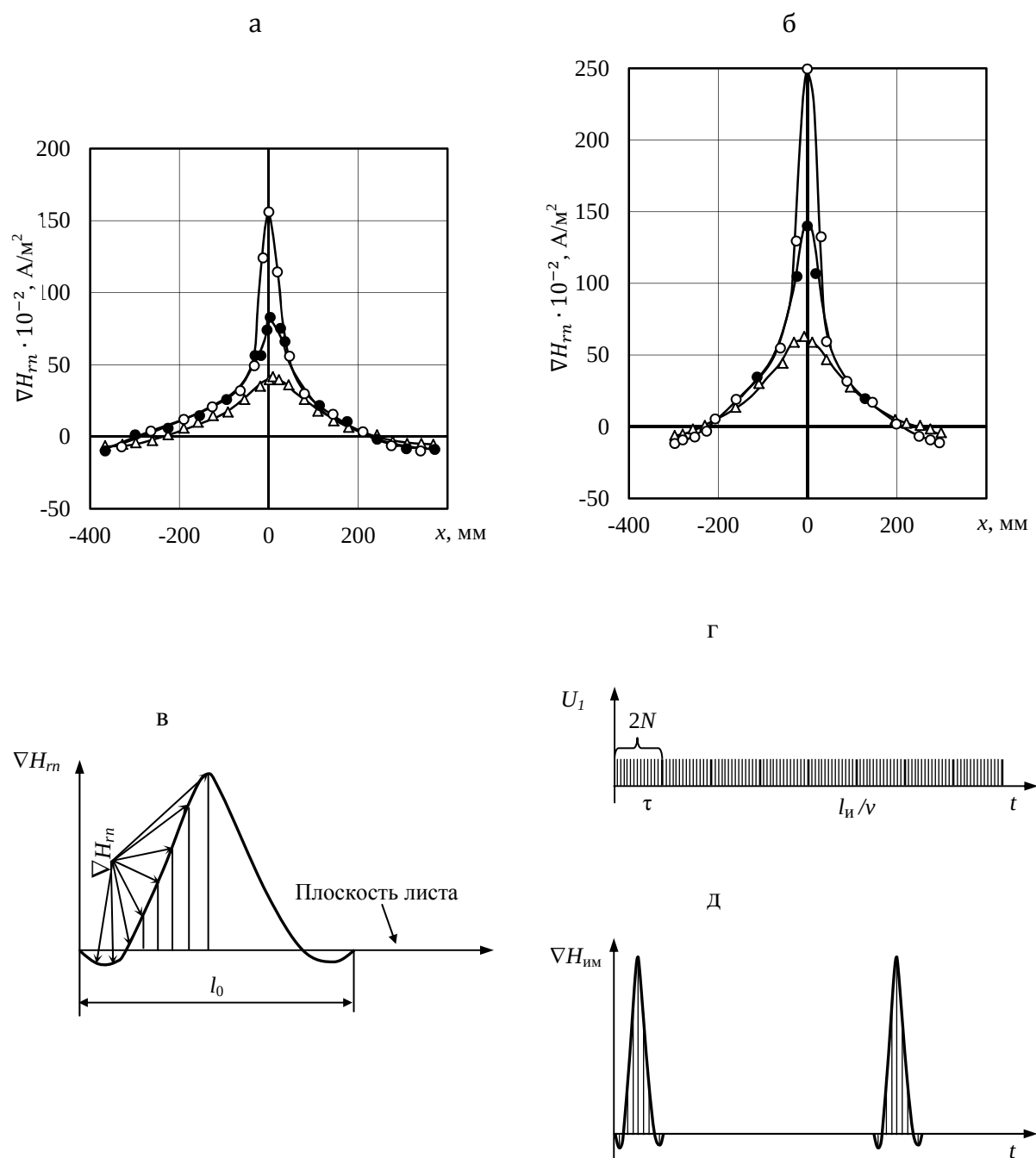
На рис. 3, а и б представлено распределение градиента напряженности поля остаточной намагниченности локального участка листа вдоль направления прокатки x , снятого на расстояниях 0, 15 и 50 мм от поверхности образцов из стали 08кп толщиной 0,8 мм и размером 1000×1000 мм², при различных режимах термообработки (намагничивание образцов осуществляли намагничивающей системой установки ИМПОК-2).

Из рисунка видно, что форма распределения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности вдоль поверхности листа слабо зависит от его термообработки и определяется расстоянием от поверхности листа, на котором проводятся измерения.

При движении намагниченный участок проходит мимо магниточувствительных элементов поверяемого средства за время

$$t = l_0/v, \quad (26)$$

где l_0 – протяженность намагниченного участка, измеренного на неподвижном листе; v – скорость движения листа.



расстояние от поверхности: $\circ - 0, \bullet - 15, \Delta - 50$ мм; а – отжиг при $400^\circ C$; б – без отжига; в – выбор точек имитации; г – импульсы управляющего генератора; д – имитируемые импульсы

Рис. 3. Распределение градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности над поверхностью локально намагниченного листа (а, б) и формирование калибровочных импульсов

В установках типа ИМПОК [4] частота намагничивающих импульсов выбирается таким образом, чтобы намагниченные участки располагались на фиксированном расстоянии l_n друг от друга ($l_n = 5$ м). Поэтому частота f_1 , с которой намагниченные участки листа проходят мимо магниточувствительных элементов, равна

$$f_1 = v/l_n, \quad (27)$$

Так как градиент магнитного поля, создаваемый мерой типа МГПД, пропорционален току, протекающему через нее, то для получения импульсов магнитного поля, удовлетворяющих вышеизложенным требованиям, необходимо сформировать калиброванные по амплитуде импульсы тока, частота которых определяется соотношением (27), длительность – соотношением (26), а форма – распределением градиента напряженности поля остаточной намагниченности, измеренного на покоем листе.

Для этого распределение градиента напряженности поля намагниченного участка, измеренное на покоем листе, разбивается на N равных частей [16]. Величина градиента напряженности магнитного поля для каждой части разбиения заносится в блок памяти. Ввиду симметрии распределения градиента напряженности поля намагниченного участка относительно его центра, в блок памяти заносится информация о его половине (рис. 3, г). Полный импульс формируется путем последовательного перебора адресов блока памяти сначала в одном, а затем в обратном направлении. Частота, с которой необходимо опрашивать адреса блока памяти

$$f_2 = 2Nv/l_0. \quad (28)$$

Формула (28) предполагает, что размеры пятна не зависят от длительности намагничивающих импульсов. Однако при больших скоростях движения это предположение становится неверным из-за заметного смещения листа при движении за время действия намагничивающего импульса. Так, для установок типа ИМПОК-2 при скорости 25 м/с это смещение составляет примерно 75 мм при размере намагниченного участка в статике порядка 400 мм (по уровню положительной полярности). Поэтому при формировании имитируемого импульса необходимо учитывать длительность намагничивающего импульса [17–21]. Тогда длительность имитируемого импульса τ_n следует определять из условия [22, 23]

$$\tau_{\text{и}} = \frac{l_0}{v} + \tau_0, \quad (29)$$

где τ_0 – длительность намагничивающего импульса, а запомненные N значений градиента напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных вдоль намагниченного участка в статике, считывать с частотой

$$f_2^* = \frac{2Nv}{l_0 + v\tau_0}. \quad (30)$$

На основе этого метода разработан ИМИТАТОР для метрологического обеспечения (совместно с мерами типа МГПД) импульсных магнитных поточных контролеров типа ИМПОК. Структурная схема ИМИТАТОРа и его общий вид представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно, а его техническая характеристика – в табл. 2.

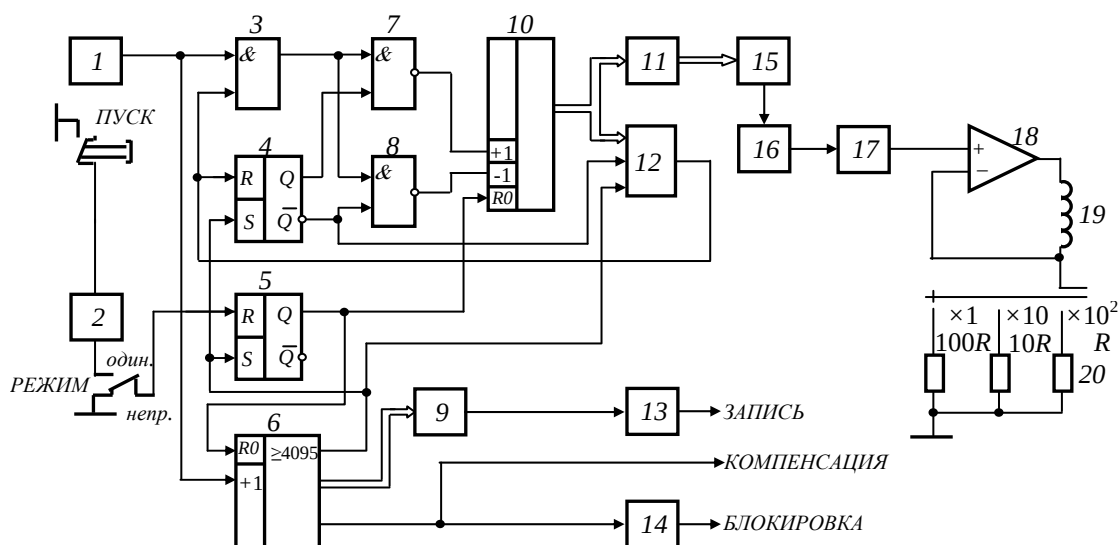
Работает ИМИТАТОР следующим образом. Выходные импульсы управляемого генератора 1 частотой $f_2 = 2Nv/l_0$ поступают на счетный вход счетчика 6 и логическую схему 3 "2И" Управление частотой осуществляется за счет изменения напряжения источника опорного напряжения. Скорости движения листа 29 м/с соответствует частота 23,8 кГц, а скорости 1 м/с – 820 Гц. В исходном состоянии потенциалы входа Q RS-триггера 4 и выхода дешифратора 12 равны единице. При этом импульсы управляемого генератора 1 через логическую схему 3 "2И" и логическую схему 7 "2И-НЕ" поступают на прямой счетный вход реверсивного счетчика 10.

Выходной код реверсивного счетчика 10, изменяющийся во времени с частотой $f_2 = 2Nv/l_0$, поступает на адресные входы программируемого постоянного запоминающего устройства (ППЗУ) 11, в котором хранится информация о величине градиента напряженности поля остаточной намагниченности в N точках намагниченного участка листа (от края намагниченного участка до его центра). Выходные коды ППЗУ 11 преобразуются в соответствующий аналоговый сигнал цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) 15. Формируемый ЦАП 15 импульс имеет ступенчатую форму. Для сглаживания он поступает на вход фильтра 16 нижних частот. Сглаженный импульс с выхода фильтра 16 через управляемый аттенюатор 17 поступает на вход усилителя мощности (УМ) 18, нагрузкой которого является мера 19 градиента магнитного поля,

включенная в цепь его токовой отрицательной обратной связи. Благодаря этому форма импульса тока в мере точно повторяет форму импульса, поступающего на вход усилителя мощности 18.

Низкий уровень на выходе $\bar{Q}$ RS-триггера 4 устанавливает дешифратор 12 в положение дешифрирования момента полного заполнения реверсивного счетчика 10, то есть на выходе упомянутого дешифратора устанавливается нулевой уровень, когда все разряды реверсивного счетчика 10 устанавливаются в единицу.

Когда при прямом счете реверсивного счетчика 10 происходит его полное заполнение (то есть перебраны все адреса ППЗУ 11), срабатывает дешифратор 12 и перебрасывает RS-триггер 4. При этом блокируется логическая схема 7 "2И-НЕ" и разблокируется логическая схема 8 "2И-НЕ". Выходные импульсы управляемого генератора 1 начинают поступать на вход обратного счета реверсивного счетчика 10, а высокий уровень выхода $\bar{Q}$ RS-триггера 4 переводит дешифратор 12 в положение дешифрирования нулевого состояния этого счетчика. Начинается перебор адресов ППЗУ 11 в обратном направлении.



- 1 – управляемый генератор, 2 – одновибратор, 3 – логическая схема "2И", 4 и 5 – RS-триггеры,
6 – двоичный счетчик, 7 и 8 – логические схемы "2И-НЕ", 9 – дешифратор,
10 – реверсивный двоичный счетчик,
11 – программируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ),
12 – управляемый дешифратор,
13 и 14 – одновибраторы, 15 – цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), 16 – фильтр нижних частот (ФНЧ), 17 – управляемый аттенюатор, 18 – усилитель мощности (УМ), 19 – мера градиента магнитного поля (МГПД), 20 – резисторы токовой отрицательной обратной связи

Рис. 4. Структурная схема ИМИТАТОРа

При достижении содержимым реверсивного счетчика 10 нулевого значения вновь срабатывает дешифратор 12 и блокирует логическую схему 3 "2И". Поступления импульсов с управляемого генератора 1 на входы реверсивного счетчика 10 прекращается. Формирование импульса закончено.

Следующий такт формирования импульса начинается после переполнения счетчика 6. При этом сигнал переполнения, снимаемый с соответствующего выхода этого счетчика, блокирует дешифратор 12 и перебрасывает RS-триггера 4 в исходное состояние. Далее цикл повторяется.

В непрерывном режиме RS-триггер 5 заблокирован по входу R нулевым потенциалом и участия в работе ИМИТАТОРа не принимает.

В режиме формирования одиночных импульсов вход R RS-триггера 5 подключается к одновибратору 2. При нажатии кнопки ПУСК этот триггер устанавливается в исходное состояние и разблокирует по установочным входам R0 счетчики 6 и 10. При этом начинается формирование импульса. По окончании цикла формирования импульса сигнал переполнения счетчика 6 перебрасывает RS-триггер 5, который блокирует счетчики 6 и 10. ИМИТАТОР переходит в режим ожидания. При следующем нажатии кнопки ПУСК процесс повторяется.

Амплитуда импульса тока в мере 19 регулируется за счет изменения коэффициента передачи управляемого аттенюатора 17, а диапазон изменения амплитуды тока регулируется переключением номиналов резисторов токовой отрицательной обратной связи (R, 10R, 100R).

Для функционирования установок ИМПОК при калибровке и проверке формирование калибровочных импульсов с заданным распределением градиента напряженности магнитного поля в пространстве и времени сопровождается формированием трех синхроимпульсов: ЗАПИСЬ, БЛОКИРОВКА и КОМПЕНСАЦИЯ. Синхроимпульс КОМПЕНСАЦИЯ снимается со старшего разряда счетчика 6. Синхроимпульс БЛОКИРОВКА формируется одновибратором 14, запуск которого производится задним фронтом сигнала, снимаемого со старшего разряда счетчика 6. Синхроимпульс ЗАПИСЬ формируется одновибратором 13, запуск которого осуществляется передним фронтом выходного сигнала дешифратора 9.

Дешифратор срабатывает при достижении содержимым счетчика 6 числа 4032. Емкость счетчика равна 4095.



Рис. 5. Общий вид ИМИТАТОРа

Таблица 2. Технические характеристики ИМИТАТОРа

Характеристика	Величина
предел установки амплитуды градиента напряженности магнитного поля, А/м ²	1-9,99·10 ² 10-9,99·10 ³ 100-9,99·10 ⁴
погрешность установки амплитуды градиента напряженности магнитного поля, %	3
диапазон имитируемых скоростей движения проката, м/с	1-29
погрешность установки имитируемой скорости движения проката (не более), %	10
длительность импульсов градиента напряженности магнитного поля (в зависимости от величины имитируемой скорости), мс	24-700
режим формирования импульсов градиента напряженности магнитного поля	одиночный непрерывный
длительность синхроимпульсов ЗАПИСЬ БЛОКИРОВКА	100±20 мкс 10±2 мс
амплитуда синхроимпульсов, В ЗАПИСЬ БЛОКИРОВКА КОМПЕНСАЦИЯ	12±2 12±2 12±2
время установления рабочего режима, мин, не более	5
потребляемая мощность от сети 220 В, ВА, не более	80
габаритные размеры (не более), мм длина ширина высота	367 520 158
Масса (не более), кг	11

Методики метрологической аттестации и поверки средств импульсного магнитного контроля механических свойств ферромагнитных изделий протяженной формы с помощью разработанных средств аттестации (мер МГПД и ИМИТАТОРА) утверждены в БелГИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная мера градиента магнитного поля типа МГПД создает в областях расположения магниточувствительных элементов преобразователей поверяемых средств импульсного магнитного контроля магнитные поля с постоянным градиентом, причем величина и знак поля, воздействующего на соответствующий магниточувствительный элемент, совпадают с величиной и знаком поля локально с двух сторон намагниченного листа. Полученные выражения позволяют связать средние радиусы катушек меры с протяженностью рабочей области, определяемой длиной магниточувствительного элемента и зазором между преобразователями поверяемого средства при одинаковом числе витков в соответствующей системе меры. Мера защищена авторскими свидетельствами и патентами. Метрологическая аттестация меры МГПД проводится в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург), так как в Республике Беларусь образцовых средств измерений в создаваемом этими мерами диапазоне полей не имеется.

Установление соотношения между величиной создаваемого в рабочих областях меры магнитного поля и величиной его градиента за счет соответствующего соотношения витков системы для создания однородного магнитного поля и системы для создания магнитного поля с постоянным градиентом позволяет снизить влияние на моделируемое поле длительности импульсов и температуры.

На основе моделирования воздействия поля остаточной намагниченности локально намагниченного участка контролируемого листа на магниточувствительные элементы поверяемого средства при различных скоростях движения объекта контроля создан ИМИТАТОР, позволяющий сформировать в рабочих областях меры импульсы магнитного поля, частота, амплитуда и форма (во времени) которых аналогична частоте, амплитуде и форме импульсов магнитного поля от намагниченного участка контролируемого листа при его прохождении мимо магниточувствительных элементов средства контроля.

Литература

1. Матюк В.Ф. Метрологическое обеспечение импульсных магнитных анализаторов. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2013, № 3, с. 17–37.
2. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д. Метрологическое обеспечение импульсно-локального магнитного метода контроля. – В кн.: Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции. М: МДНТП, 1977, с. 130–135.
3. Matyuk V.F., Piunov V.D. Metrological support of devices for pulse magnetic testing of ferromagnetic articles. – In book: Achievements in Physics of Electromagnetic Nondestructive Testing. Proceedings of the Institute of Applied Physics of Academy of Sciences of Belarus. Minsk-Tokyo, 1994, p. 236–256.
4. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии листового проката сталей в технологическом потоке производства. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2013, № 2, с. 3–28.
5. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Пиунов В.Д. Метрологическое обеспечение приборов импульсного магнитного контроля ферромагнитных материалов. – Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1987, № 2, с. 107–112.
6. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Пиунов В.Д. Устройство для калибровки и поверки средств магнитного контроля ферромагнитных изделий. – Авт. свид. СССР № 1255910. – Бюл. изобр., 1986, № 33, с. 169.
7. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Пиунов В.Д. Мера для поверки средств импульсного магнитного контроля механических свойств листового проката в потоке производства. – В кн.: Современные методы неразрушающего контроля и их метрологическое обеспечение. Тезисы докл. 7-ой Уральской научно-техн. конф. 9–11 апреля 1986 г. Часть I: Магнитные и электромагнитные методы. – Устинов, 1986, с. 32–33.
8. Melgui M.A., Matjuk V.F., Piunov V.D. Dispositif pour l'étalonnage et la vérification des moyens de contrôle magnétique de produits ferromagnétiques. Патент Франции № 2.564.201. – Bulletin Officiel de La Propriete Industrielle, 1985, № 46. (Изобретения стран мира, 1986, № 7, вып. 106, с. 56).
9. Melgij M.A., Matjuk V.F., Piunov V.D. Vorrichtung zum Eichen und Überprüfen von Mitteln zur Magnetprüfung von ferromagnetischen Erzeugnissen. Патент ГДР № 261722. – Изобретения за рубежом, 1989, № 12, вып. 7, с. 68.
10. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Пиунов В.Д. Метрологическое обеспечение средств импульсного магнитного контроля. – В кн.: Научно-техн. конф. с международным участием "Стандартизация и управление качеством в металлургии и минеральном сырье". 28–29 сентября 1989 г. – Албена-Варна, 1989, с. 32.
11. Melgui M.A., Matjuk V.F., Piunov V.D. Eich- und Prüfeinrichtung für Mittel zur magnetischen Kontrolle ferromagnetischer Erzeugnisse. Патент ФРГ № 3.418.013. – Auszüge aus den Offenlegungsschriften, 1985, № 47. (Изобретения стран мира, 1986, № 12, вып. 106, с. 43).
12. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Пиунов В.Д. Метрологическое обеспечение средств импульсного магнитного контроля. – Деп. № 4609/89 НД. – София: ЦИНТИ, 1989. – 10 с.
13. Средства измерения параметров магнитного поля / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев и др. – Л.: Энергия, Ленинградское отд-е, 1979. – 320 с.
14. McKeehan L.W. Combinations of circular currents for producing uniform magnetic

- field. – Review Scientific Instrumentation. 1936, Vol. 7, No. 3, p. 150–153.
15. McKeehan L.W. Combinations of circular currents for producing uniform magnetic field gradients. – Review Scientific Instrumentation. 1936, Vol. 7, No. 4, p. 178–179.
 16. Цукерман В.Л., Матюк В.Ф., Новиков А.П. Имитатор для метрологического обеспечения средств импульсного магнитного контроля – Дефектоскопия, 1992, № 10, с. 60–65.
 17. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Леонов И.Г. Способ калибровки и поверки импульсных устройств для магнитного контроля. Авт. свид. № 1029070. – Бюл. изобр., 1985, № 46, с. 277.
 18. Melguy M.A., Matjuk V.F., Leonov I.G. Verfahren zum Eichen und Prüfen von Impulseinrichtungen für Magnetpulverprüfung. Патент ГДР № 230647. – Бюл. ГДР, 1985, № 49 (Изобретения стран мира, 1986, № 13, вып. 106, с. 9).
 19. Melguy M.A., Matjuk V.F., Leonov I.G. Zpusob kalibrace a přezkoušení impulsních zařízení na magnetickou kontrolu fyzikálně-mechanických parametrů. Авт. свид. ЧССР № 245466. – Бюл. ЧССР, 1986, № 10 (Изобретения стран мира, 1987, № 11, вып. 108, с. 43).
 20. Melgui M.A., Matjuk V.F., Leonov I.G. Eljárás impulzusüzemu, mágneses ellenőrzéshez alkalmazott eszközök hitelesítésére és ellenőrzésére. Патент ВНР № 190888. – Изобретения за рубежом, 1988, № 1, вып. 7, с. 86.
 21. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Леонов И.Г. Метод за калибриране и поверка на импулсни устройства за магнитен контрол. Авт. свид. НРБ № 42140. – Бюл. НРБ, 1987, № 10 (Изобретения за рубежом, 1989, № 1, вып. 7, с. 61).
 22. Матюк В.Ф., Цукерман В.Л. Способ калибровки и поверки импульсных устройств для магнитного контроля. Авт. свид. № 1778672. – Бюл. изобр., 1992, № 44, с. 144.
 23. Матюк В.Ф., Цукерман В.Л. Имитатор градиента магнитного поля для поверки средств магнитного контроля листовых ферромагнитных материалов. Авт. свид. № 1824601. – Бюл. изобр., 1993, № 24, с. 87.

Статья поступила в редакцию 19.08.13

Подготовка специалистов по неразрушающему контролю в ИПФ НАН Беларуси

Стойчева И.В.

Институт прикладной физики НАН Беларуси является единственной в Республике Беларусь организацией, в которой на базе Научно-методического Центра проводится подготовка специалистов по тепловому методу контроля с целью последующей сдачи ими экзамена на 2-й уровень квалификации в органе по сертификации.

Обучение проводится по 80 часовой программе и включает рассмотрение физических основ метода теплового контроля и практику применения теплового контроля – аппаратуру и технологию теплового контроля, а также вопросы метрологического обеспечения и стандартизации.

Программа курса содержит следующие основные разделы:

- общие сведения о температуре;
- методы и приборы контактной термометрии;
- тепловое излучение;
- элементы теории оптико-электронных приборов;
- основы теории теплообмена;
- теплофизические основы ТНК, технология ТНК;
- строительная теплотехника ограждающих конструкций;
- приборы бесконтактной термометрии (пирометры, тепловизоры);
- методические рекомендации по проведению ТНК;
- методические погрешности бесконтактной термометрии;
- методики ИК обследования;
- ИК диагностика в строительстве;
- нормативные документы теплового контроля (ГОСТы, методики).

Практическая часть обучения включает:

- работа с тепловизорами, пирометрами, контактными термометрами;
- обработка термограмм на РС;
- составление технологической карты теплового контроля;
- расчет теплового сопротивления ограждающих конструкций и расчет относительного сопротивления теплопередаче.

Практическая работа проводится с использованием технической базы ИПФ НАН Беларуси и аккредитованной в области ТНК лаборатории радиационно-конвективного теплообмена Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси.

Основное оборудование, применяемое при обучении:

	Тепловизор FLIR E300 Диапазон измерений температуры: от -20 до +350°C, спектральный диапазон: 8 – 12 мкм
	Тепловизор ИРТИС-2000 Диапазон измерений температуры: от –60 до +1200°C, спектральный диапазон: 3-5 мкм
	Пирометр Нимбус-760 Диапазон измерений температуры: от –32 до +760 °C
	Инфракрасный термометр (пирометр) Testo 830-T2 Диапазон измерений температуры: от –30 до +400°C
	Контактный цифровой термометр ТЦМ 9210 M2 Диапазон измерений температуры: от 0 до 1300°C
	Измеритель плотности тепловых потоков ИТП-МГ4.03/5 (I) «ПОТОК» Диапазон измерения плотности тепловых потоков: от 10 до 999 Вт/м², температуры: от –30 до +100°C
	Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4«100» Диапазон определения коэффициента теплопроводности при стационарном режиме: от 0,02 до 1,5 Вт/(м К)

Слушателей знакомят с новыми тепловизорами ведущих производителей, присутствующими на рынке Республики, их характеристиками и возможностью приобретения.

Преподаватели курсов консультируют слушателей в вопросах тепловизионных обследований и после окончания обучения.

Также в Институте проводят подготовку специалистов по 40 часовой программе по капиллярному и визуальным методам с целью сертификации на 2-й уровень квалификации.

Подготовку специалистов проводят ведущие в республике специалисты – доктора и кандидаты наук, имеющие большой опыт практической, педагогической и научной работы.

Слушатели обеспечиваются новейшей учебной и методической литературой, образцами, национальными и европейскими стандартами, в том числе специальными учебными пособиями.

Планируется ежемесячно проводить научно-практические семинары по визуальному и капиллярному методам контроля и один раз в квартал – по тепловому методу контроля

Заявки направлять по адресу:

220072 г. Минск, ул. Академическая, 16.

Тел. (факс) 284-21-84,

информацию можно получить по моб. тел. 356-96-90.

(См. 4 страницу обложки)

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ

**ГНПО «НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
НАН БЕЛАРУСИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ»**

**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ
(ИПФ НАН БЕЛАРУСИ)**

Международная научно-техническая конференция

**«ДОСТИЖЕНИЯ ФИЗИКИ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ»**

Программа



Республика Беларусь, г. Минск

15 октября 2013 г.

***Посвящается 50-летию со дня создания
Института прикладной физики НАН Беларуси***

Минск 2013

Глубокоуважаемый (ая)

Приглашаем Вас принять участие в Международной научно-технической конференции
**«ДОСТИЖЕНИЯ ФИЗИКИ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ»**,
которая состоится **15 октября 2013 г.** в конференц-зале Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (Минск, 220072, ул. Академическая, 16, к. 403).

Формат конференции:

- пленарное заседание (9³⁰ – 12⁰⁰)
- стендовые доклады (9³⁰ – 13⁰⁰)
(стендовые доклады будут оформлены и вывешены организаторами конференции)

Телефон Оргкомитета (+375 17) 284-23-00

Официальными языками конференции являются русский, белорусский, английский.

**15⁰⁰ – Торжественное заседание расширенного
Ученого совета, посвященное 50-летию института**
(место проведения – актовый зал Объединенного института
проблем информатики НАН Беларуси, ул. Сурганова, 6)

ОРГКОМИТЕТ

Мигун Н.П., д.ф.-м.н., ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь, сопредседатель
Клюев В.В., академик РАН, НИИ интроскопии МНПО «Спектр», Москва, Россия, сопредседатель

Мелешко А.Л., к.т.н., ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь, секретарь

Анищик В.М., д.ф.-м.н., БГУ, Минск, Беларусь

Артемьев В.М., чл.-корр. НАН Беларуси, ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Артемьев Б.В., д.т.н., НИИ интроскопии МНПО «Спектр», Москва, Россия

Брановицкий И.И., д.т.н., ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Венгринович В.Л., д.т.н., ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Ewert U., Prof., Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, Germany

Горкунов Э.С., академик РАН, Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Гусев О.К., д.ф.-м.н., БНТУ, Минск, Беларусь

Жагора Н.А., д.т.н., БелГИМ, Минск, Беларусь

Зацепин Н.Н., чл.-корр. НАН Беларуси, ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Зуйков И.Е., д.ф.-м.н., БНТУ, Минск, Беларусь

Кожаринов В.В., д.т.н., Латвийское общество неразрушающего контроля, Рига, Латвия

Красневский Л.Г., чл.-корр. НАН Беларуси, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Кучинский П.В., д.ф.-м.н., НИИ прикладных физических проблем БГУ, Минск, Беларусь

Лобанов Л.М., академик НАН Украины, Институт электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины, Киев, Украина

Лухвич А.А., д.т.н., ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Майоров А.Л., к.т.н., ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Матюк В.Ф., д.т.н., ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Мельгуй М.А., д.т.н., ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Nardoni G., PhD, I & T Nardoni Institute, Brescia, Italy

Новиков В.А., д.т.н., Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь.

Пантелеенко Ф.И., чл.-корр. НАН Беларуси, БНТУ, Минск, Беларусь

Рудницкий В.А., д.т.н., ИПФ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Сергеев С.С., к.т.н., Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

Троицкий В.А., д.т.н., Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, Киев, Украина

Федосюк В.М., д.ф.-м.н., ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

Чижик С.А., чл.-корр. НАН Беларуси, Президиум НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Schreiber J., Prof., Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing, Dresden, Germany

**15 октября 2013 г. Конференц-зал Института прикладной физики
НАН Беларуси**

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ (9³⁰ – 12⁰⁰)

Председатель: директор Института прикладной физики НАН Беларуси д.ф.-м.н. Н.П.Мигун

9³⁰ – 9³⁵ Открытие конференции – заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси член-корреспондент НАН Беларуси С.А.Чижик.

9³⁵ – 9⁴⁰ Приветствие от Отделения физико-технических наук НАН Беларуси – академик-секретарь Отделения д.ф.-м.н. В.М.Федосюк.

ДОКЛАДЫ

9⁴⁰ – 10¹⁰ НАУЧНАЯ ШКОЛА ПО ФИЗИКЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ИПФ НАН БЕЛАРУСИ.

Мигун Н.П. *Институт прикладной физики НАН Беларуси*

10¹⁰ – 10³⁰ ДИНАМИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ.

Артемьев В.М., Наумов А.О. *Институт прикладной физики НАН Беларуси*

10³⁰ – 10⁵⁰ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ».

В.В.Клюев, В.Т.Бобров, Н.Р.Кузелёв. *ООО «МНПО Спектр», г. Москва, Россия.*

10⁵⁰ – 11¹⁰ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАГНИТОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Э.С.Горкунов. *Институт машиноведения Уральского Отделения Российской академии наук, г.Екатеринбург, Россия.*

11¹⁰ – 11³⁰ ВИБРОМОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ МОБИЛЬНЫХ МАШИН.

Н.Н.Ишин, А.М.Гоман, А.С.Скороходов. *Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси*

11³⁰ – 11⁵⁰ КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ИНДЕНТИФИКАЦИИ.

А.П.Крень. *Институт прикладной физики НАН Беларуси.*

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ (9³⁰ – 13⁰⁰)

В.М.Артемов, А.О.Наумов, Л.Л.Кохан. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ КЛЕТОК

А.Р.Баев, А.Л.Майоров, Г.Е.Коновалов. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ СО СЛОИСТОЙ СТРУКТУРОЙ ВОЛНАМИ ЛЭМБА

А.Р.Баев, И.В.Стойчева, О.С.Сергеева, В.Г. Гуделев, А.И.Митьковец. ОСОБЕННОСТИ ИМПУЛЬСНО-ЛАЗЕРНОГО КОНТАКТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А.Ч.Белящ, Н.И.Курило, В.М.Сердюк, И.А.Титовицкий. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ И ДОУВЛАЖНЕНИЯ ЗЕРНА В ПОТОКЕ

Бобров С.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМА ВОЗБУЖДЕНИЯ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН SH-ПОЛЯРИЗАЦИИ

И.И.Брановицкий, Г.И.Размыслович. НЕОДНОРОДНЫЙ ХАРАКТЕР ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ ОБРАЗЦЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ВЕЛИЧИНУ И ПОГРЕШНОСТЬ КОНТРОЛЯ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ

П.Ю.Бранцевич, С.Ф.Костюк. ОРГАНИЗАЦИЯ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ВИБРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И ЗАЩИТЫ

А.А.Бузун, А.П.Бык, П.В.Бычков, В.К.Гончаров, И.И.Кравцевич, А.Е.Сиколенко. ЦИФРОВЫЕ КАМЕРЫ НА ОСНОВЕ ПЗС-ДАТЧИКОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю.В.Василевич, Е.Ю.Неумержицкая. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ В ДИАГНОСТИКЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В.Л.Венгринович. МНОГОСЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В БИОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Венгринович В.Л., Золотарев С.А. АПРИОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ – КЛЮЧ К ОПТИМАЛЬНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ ИЗ ОГРАНИЧЕННЫХ ДАННЫХ

Р.И.Воробей, О.К.Гусев, А.Л.Жарин, А.И.Свистун, А.К.Тявловский, К.Л.Тявловский. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ СОСТОЯНИЯМИ

Э.С.Горкунов, А.И.Ульянов, В.А.Захаров. ВЛИЯНИЕ ДВУХОСНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА КОЭРЦИТИВНУЮ СИЛУ СТАЛЕЙ

Э.С.Горкунов, С.М.Задворкин, Е.А.Путилова. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В РАЗЛИЧНЫХ ЗОНАХ СВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Э.С.Горкунов, Ю.В.Субачев, А.М.Поволоцкая, С.М.Задворкин, Е.А.Путилова. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ТЕКСТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Ю.И.Дудчик. ФОКУСИРОВКА РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ ОТ СИНХРОТРОННЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ ЛИНЗЫ

А.Л.Жарин, Р.И.Воробей, А.К.Тявловский, Н.И.Мухуров, А.В.Дубаневич. О ВОЗМОЖНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ МЕТОДАМИ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

В.И.Зубко, Д.В.Зубко, Г.Н.Сицко. ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НОВЫХ КОМПОЗИТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В.Коннов, А.М.Кузнецов, Т.Р.Загидулин, Р.В.Загидулин. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕИЗОЛЯЦИИ

С.В.Короткевич, В.В.Кравченко, О.В.Холодилов, А.В.Янчилик. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ СОПРЯЖЁННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Е.В.Лобко, В.В.Федоров. ЭТАЛОНЫ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МАГНИТНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ ПОКРЫТИЙ

В.М.Лукашов, С.Н.Кухаренко, Ю.В.Крышнев. ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛА НА ИЗОЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СИЛОВОГО КАБЕЛЯ В НЕФТЕДОБЫЧЕ

А.А.Лухвич. МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.А.Лухвич, В.И.Шарандо. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ ПОКРЫТИЙ

В.Ф.Матюк, В.А.Бурак. ДВУХПАРАМЕТРОВЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА РЕССОРНО-ПРУЖИННЫХ СТАЛЕЙ

Н.П.Мигун, Н.В.Деленковский, А.Б.Гнусин. НОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТАДИИ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРИ КАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

В.А.Михнев. ФАЗОВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ В ИМПУЛЬСНОЙ ПОДПОВЕРХНОСТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

В.А.Новиков, А.В.Шилов, А.В.Кушнер. КОНТРОЛЬ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ЗАПИСЬЮ ПОЛЕЙ ДЕФЕКТОВ НА ВИЗУАЛИЗИРУЮЩУЮ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЛЕНКУ В РАССЕЯННОМ СВЕТЕ

А.П.Онанко, Н.П.Кулиш, О.В.Ляшенко, Г.Т.Продайвода, С.А.Вижва, Ю.А.Онанко, И.О.Ляшенко. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО ВНУТРЕННЕМУ ТРЕНИЮ И АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА АНИЗОТРОПИИ

Ф.И.Пантелеенко, А.С.Снарский. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ПАРАМЕТРУ ДЕГРАДАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В.Г.Пинчук, С.В.Короткевич, Е.А.Ковалев. МИКРОСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА ПРИ ФРИКЦИОННОМ НАГРУЖЕНИИ

В.И.Попечиц. ДЕФЕКТОСКОПИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С ПОМОЩЬЮ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ КРАСИТЕЛЕЙ

Т.А.Протасеня, А.П.Крень. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ УГЛЕНАПОЛНЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

А.Ф.Романов, А.И.Ходасевич, И.А.Чернобай. ГЕОРАДАРНОАКУСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

А.Ф.Романов, А.И.Ходасевич, И.А.Чернобай. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГЕОРАДАРНОАКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТИ СЛОЁВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

В.А.Рудницкий, Е.В.Гнутенко. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

С.Г.Сандомирский. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРНОЙ И ФАЗОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЕЙ

В.Т.Сенють, С.А.Ковалева, В.А.Ржецкий, Л.В.Маркова, Т.В.Гамзелева, М.Л.Хейфец. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СВЕРХТВЕРДЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАНОАЛМАЗОВ И ПЛОТНЫХ ФОРМ НИТРИДА БОРА

С.С.Сергеев, А.П.Марков, К.С.Захарова. СТРУКТУРА И СХЕМЫ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ МУТНОМЕТРИИ

А.А.Ткаченко. КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА НА СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА

В.А.Троицкий, М.Н.Карманов, В.М.Горбик. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НИЗКОЧАСТОТНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

В.А.Троицкий. ПОРТАТИВНАЯ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА

А.В.Чернышев. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ГЛУБИНОЙ ПРОНИКНОВЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В ПРОВОДЯЩЕЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО, ЧАСТОТОЙ ПОЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ НАКЛАДНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ



Брановицкий Иван Иванович

Branovitsky I.I.

доктор технических наук

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
заведующий лабораторией

Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16

Тел. +(375 17) 284 15 77,

e-mail: branovitsky@iaph.bas-net.by



Матюк Владимир Федорович

Matyuk V.F.

доктор технических наук

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
заведующий лабораторией

Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16

Тел. +(375 17) 284 18 55,

e-mail: matyuk@iaph.bas-net.by



Мигун Николай Петрович

Migoun N.P.

доктор физико-математических наук

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
директор

Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16

Тел./факс (+375 17) 284 17 94,

e-mail: migoun@iaph.bas-net.by



Скурту Игорь Тарасович

Scurtu I.T.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
младший научный сотрудник

Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16

Тел.: (+375 17) 284 10 80,

e-mail: tisotta@tut.by



Стойчева Инна Валентиновна

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», с.н.с.,
Руководитель научно-методического центра неразрушающего
контроля

Адрес: 220072 Минск, ул. Академическая, 16, к. 406

Тел. +(375 17) 284 21 84,

моб.: 8 029 356 96 60,

e-mail: stoicheva@iaph.bas-net.by

**Правила для авторов
научно-практического журнала
«Неразрушающий контроль и диагностика»**

Для публикации оригинальной статьи авторы должны представить в редакцию следующие материалы:

1. Авторское заявление с указанием контактной информации (в электронном и бумажном виде).

2. Направление от организации, в которой выполнялась работа (в бумажном виде на бланке организации). Направление не требуется, если работа выполнялась за рубежом.

3. Файл с текстом статьи в формате WinWord, а также в бумажном виде или в электронном в формате pdf. Если одновременно с русским текстом статьи по желанию авторов публикуется ее английский перевод, он представляется отдельно.

4. Файлы в формате WinWord с текстом аннотации на русском и английском языках. Перевод на английский язык осуществляется авторами. Каждая аннотация, кроме собственно текста, должна включать в себя заглавие статьи, фамилии и инициалы авторов, также на русском и английском языках.

5. Файл в формате WinWord, в котором следует указать информацию для Авторского указателя:

- на русском языке – сведения об авторах (фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, звание, должность, место работы, телефон, факс, адрес электронной почты и другая контактная информация по усмотрению автора);

- на английском языке – транслитерацию фамилий и имен авторов, а также название учреждений, где выполнялась работа.

6. Фотографии авторов в электронном виде для размещения в Авторском указателе. Фамилия автора должна входить в имя файла с фотографией.

Бумажные версии документов могут быть представлены в редакцию любым из следующих способов:

- отправлены по факсу редакции: **(+375 17) 284 17 40;**

- присланы обычной почтой или переданы непосредственно по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, **Государственное предприятие «Диа-тех», редакция журнала «Неразрушающий контроль и диагностика».**

Электронные версии документов должны быть присланы в редакцию по электронной почте на адрес *info@science.by*.

К публикации в журнале «Неразрушающий контроль и диагностика» принимаются статьи, прошедшие рецензирование. Поступившая в редакцию рукопись направляется по выбору редакции на отзыв специалисту в данной области исследований. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала на основании экспертных оценок рецензентов с учетом соответствия представленных материалов тематической направленности журнала, их научной значимости и актуальности. Рукопись, получившая отрицательные отзывы двух независимых рецензентов, решением редколлегии отклоняется.

Как правило, объем статьи не должен превышать 10-15 страниц машинописного текста (включая таблицы и список литературы на отдельных страницах), количество иллюстраций – не больше четырех. Объем научного обзора не должен превышать 25 страниц.

Статьи должны быть написаны на русском (или английском) языке, отредактированы и оформлены в соответствии с нижеследующими требованиями.

Основной текст статьи

Каждая статья должна представлять собой файл, содержащий текст, набранный в редакторе WinWord, шрифт Cambria, кегль 14 пунктов, 1 интервал. При отсутствии установленного шрифта Cambria допустимо использовать шрифт Times New Roman. Должен быть включен режим автоматического переноса.

Перед текстом статьи отдельной строкой в левом верхнем углу обязательно должен быть приведен код универсальной десятичной классификации (УДК) тематики статьи (шрифт – кегль 12).

Статья начинается с заголовка, который пишется строчными буквами полужирным шрифтом размером 16 пунктов. Далее следует список авторов в формате «фамилия, инициалы», который пишется полужирным шрифтом 14 пунктов. Имена авторов разделяются запятыми.

Текст аннотации в виде абзаца с выравниванием по ширине с отступами 5 мм справа и слева шрифтом 12 пунктов.

Страницы статьи не должны быть пронумерованы. Поля на странице должны быть: левое и правое – по 25 мм, верхнее – 30 мм, нижнее – 32 мм.

Графические иллюстрации

Таблицы, иллюстрации и подписи к ним размещаются в тексте статьи при первом их упоминании. При этом следует избегать использования опции «обтекание текста».

Таблицы снабжаются тематическими заголовками и нумеруются арабскими цифрами в порядке их упоминания в тексте. Все графы в таблицах должны иметь заголовки. Сокращение слов в таблицах не допускается. Все аббревиатуры должны быть расшифрованы в сносках к таблице.

Графики и схемы должны выполняться с помощью графического редактора CorelDraw. Использование графических средств Microsoft Office крайне нежелательно из-за частых искажений рисунков при верстке, преобразовании в pdf-формат и печати. Рисунки следует присылать в виде отдельных файлов с сохранением форматов, использованных для их создания. Недопустимо использовать при создании рисунков «волосяные» линии (1/4 пункта). Эти линии хорошо видны на экране монитора, но исчезают в печатной версии документа.

Фотографии представляются в виде отдельных файлов в форматах jpeg, tiff, bmp, png с разрешением 300-600 dpi.

Штриховые рисунки, выполненные от руки, должны быть отсканированы в режиме bitmap с разрешением не ниже 600 dpi и сохранены в формате tiff.

Формулы

Математические формулы набираются в WinWord встроенным редактором формул, в качестве которого в последних версиях WinWord используется упрощенный вариант редактора формул MathType. В случае недостаточности упрощенного варианта необходимо установить полную коммерческую версию MathType. Уравнения располагаются по центру строки и нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках в порядке их упоминания в тексте. Номера уравнений выравниваются по правому краю строки. Уравнения отделяются от текста сверху и снизу одной пустой строкой. При написании нескольких уравнений они также разделяются пустой строкой.

В НОМЕРЕ

20 ЛЕТ БАНК И ТД	3
20 лет Белорусской Ассоциации неразрушающего контроля и технической диагностики <i>Мизун Н.П.</i>	3
НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ	8
Высококчувствительный метод диагностики витковых замыканий <i>Брановицкий И.И., Скурту И.Т.</i>	8
Метрологическое обеспечение импульсных магнитных анализаторов <i>Матюк В.Ф.</i>	17
Метрологическое обеспечение импульсных магнитных поточных контролеров <i>Матюк В.Ф.</i>	38
В ОРГАНИЗАЦИЯХ НК И ТД	60
Подготовка специалистов по неразрушающему контролю в ИПФ НАН Беларуси <i>Стойчева И.В.</i>	60
КОНФЕРЕНЦИИ И ВЫСТАВКИ НК И ТД	63
Международная научно-техническая конференция «ДОСТИЖЕНИЯ ФИЗИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ». Программа	63
Авторский указатель	71
Правила для авторов	72

**Подготовка специалистов
по неразрушающему контролю
в ИПФ НАН Беларуси (стр. 61)**

