115280

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

В. В. КЛЮЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА ПРИБОРОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ, ТОЛЩИНЫ И СМЕЩЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

(№ 253 — Приборы и устройства автоматики и телемеханики)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 1970

Диссертационная работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана и в Научно-исследовательском институте интроскопии.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Толстоусов Г. Н.,
доктор технических наук Родигин Н. М.,
доктор технических наук Румянцев С. В.

Голо[illegible]ко-технический
институ[illegible]

Авт[illegible] г.

Защ[illegible]
1970 г[illegible]строительного
факул[illegible] 2-я Бауман-
ская у[illegible]

С д[illegible]отеке МВТУ
им. Н.[illegible]

А 115280

Л-80334 [illegible]к. 21. Тир. 250

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1115280
Клюев В.В. Исследование э

В В Е Д Е Н И Е

Повышение качества промышленной продукции является одним из главных направлений технического прогресса, определенного XXIII съездом КПСС. Создание новых материалов, улучшение технологии производства, а также совершенствование конструкций механизмов открывают пути для повышения надежности и долговечности машин. Большую роль при этом должны играть средства неразрушающего контроля металлов, с помощью которых устанавливается не только объективная оценка качества изделия, но и определяются места, операции и причины возникновения брака. Особенно актуальной на сегодняшний день является проблема создания автоматизированных средств неразрушающего контроля для высокоскоростных производственных процессов и технологических испытаний изделий. Для автоматизации производства, сокращения многочисленных штатов сотрудников отделов технического контроля, уменьшения рабочих площадей и повышения качества выпускаемой продукции необходимы новые более совершенные автоматические средства неразрушающего контроля.

1115280

Качество изделий в большой степени зависит от количества и параметров дефектов типа нарушения сплошности металла, а также от степени соответствия толщины материала и гарантированных зазоров в изделии допускаемым отклонениям. В настоящее время разработаны физические основы электромагнитных методов контроля дефектов, толщины и смещений изделий, однако, реализация этих методов в приборостроении происходит крайне медленно. Цель настоящей работы - исследовать основные проблемы разработки приборов дефектоскопии /обнаружения

дефектов/, толщинометрии и виброметрии изделий в условиях их производства на металлургических заводах, либо испытаний - на машиностроительных. Главное внимание уделяется: выбору наиболее эффективного метода контроля; разработке рационального типа и конструкции входного преобразователя с учетом специфики поточного металлургического производства ферромагнитных труб, прутков и листов, либо условий технологических испытаний изделий; исследованию способствующих и мешающих факторов, в особенности влияния скорости движения изделий; количественному определению максимальной чувствительности приборов к контролируемому параметру и мешающему фактору; расчету измерительных схем и обоснованию основных аспектов разработки автоматизированных электромагнитных установок неразрушающего контроля дефектов, толщины и смещений изделий.

Состояние исследований и постановка задачи

Анализ современного состояния исследований и направлений разработки приборов в области электромагнитного неразрушающего контроля показывает, что благодаря усилиям советских ученых в области научных исследований достигнуты значительные успехи. Аналитически и экспериментально изучены магнитные поля рассеяния дефектов ферромагнитных изделий, определены пути и способы их индикации, исследованы конструкции магнитнопорошковых, феррозондовых и др. систем магнитных измерений. Получен обширный материал по анализу метода вихревых токов, вычислению вносимого импеданса накладных, проходных и экранных преобразователей применительно к испытаниям прутков, листов, труб и плоских изделий из неферромагнитных материалов. Конструкции ряда разработанных приборов /МГК-I, ТВФ, ИЭ-I и

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

др./ находятся на уровне лучших зарубежных образцов, внедрены в производство и дают большой экономический эффект.

Однако на развитие приборостроения в области электромагнитного неразрушающего контроля влияет ряд сдерживающих моментов. Отсутствуют завершенные методики инженерных расчетов и сравнение различного типа вихретоковых преобразователей для контроля ферромагнитных материалов; количественно не оцениваются возможности и оптимальные параметры схем приборов, что приводит на практике к необоснованным упрощениям, либо к бесполезным усложнениям аппаратуры; нет сравнительного анализа метода постоянных полей рассеяния и метода вихревых токов применительно к выявлению нарушений сплошности металла в условиях поточного производства ферромагнитных изделий типа труб, прутков и листов. Создалось положение, при котором не обоснованы рекомендации для широкого внедрения наиболее рациональных преобразователей и средств электромагнитного неразрушающего контроля дефектов. Недостаточно проведены исследования электромагнитных методов толщинометрии ферромагнитных материалов, а также методов вихретоковой виброметрии. Не изучено воздействие ряда факторов производственной эксплуатации приборов и, в первую очередь, эффекта скорости движения объекта контроля. Как следствие, не решены вопросы разработки и внедрения автоматизированных промышленных установок дефектоскопии, толщинометрии и виброметрии изделий из ферромагнитных материалов.

На основании приведенных соображений, в данной работе были поставлены следующие задачи:

- Провести исследования и осуществить систематизацию методов вычисления параметров вихретоковых преобразователей

различного типа /проходного наружного, проходного внутреннего, проходного экранного, накладного и накладного экранного/, оценить погрешность существующих методик и создать новые более точные инженерные методики расчета для высокочастотных накладных, накладных экранных, а также внутренних, наружных и экранных проходных систем измерения.

- Осуществить исследования и дать сравнение амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых характеристик приборов с вихретоковыми преобразователями накладного, накладного экранного, проходного наружного, проходного внутреннего и проходного экранного типа для неразрушающего контроля ферромагнитных изделий в слабых полях. Выполнить теоретический и экспериментальный анализ диаграммы направленности полезадающих систем преобразователей приборов.

- Изучить и дать обобщенные рекомендации по полезному использованию и отстройке от эффекта движения объекта контроля при электромагнитных методах испытаний с помощью накладных, экранных и проходных вихретоковых преобразователей.

- Исследовать, дать сравнение и показать области рационального применения метода вихревых токов и метода считывания постоянных магнитных полей рассеяния при дефектоскопии прутков, труб и листов из углеродистых марок сталей. Разработать промышленные установки для дефектоскопического контроля труб, прутков и листов применительно к условиям автоматизированного прокатного производства.

- Исследовать вихретоковые методы толщинометрии ферромагнитных деталей. Обосновать рациональные измерительные схемы и конструкции входных преобразователей вихретоковых толщиномеров ферромагнитных материалов. Разработать промышленные

образцы измерителей толщины ферромагнитной полосы для поточного металлургического производства.

- Провести исследования и дать обобщение по разработке методов вихретоковой виброметрии. Разработать инженерные методики расчета чувствительности, быстродействия и линейности характеристик измерителей зазоров. Создать промышленные образцы вихретоковых виброметров и измерителей смещений.

Методы расчета параметров вихретоковых преобразователей

Путем решения уравнений Максвелла единым методом разделения переменных, дается систематизация и обобщение исходных выражений, необходимых для исследования приборов электромагнитного контроля качества однослойных ферромагнитных изделий в виде труб и листов с вихретоковыми преобразователями накладного, проходного /внутреннего и наружного/ и экранного типа. Проводится анализ методов вычисления несобственных интегралов, входящих в исходные выражения. Численным методом с помощью ЭВМ получены годографы напряжения накладного экранного преобразователя и проходного двухвиткового преобразователя, расположенного над немагнитным и ферромагнитным прутком. При вычислении интегралов для проходных преобразователей использована программа на основе квадратурных формул Гаусса. Начальный шаг интерполяции определялся полиномом Лежандра пятой степени. Если заданная точность $\xi = 10^{-5}$ при сравнении с полиномом седьмой степени не обеспечивалась, деление участка проводилось вплоть до $m = 11$.

Приближенное вычисление несобственных интегралов для ряда случаев осуществлялось с помощью квадратур наивысшей алге-

бранческой степени точности, где в качестве узлов выбраны корни многочлена Лаггера степени n . Сравнение показывает, что для получения погрешностей меньше I5 % расчет вихретоковых преобразователей накладного и наружного проходного типа должен проводиться с числом узлов более 3.

Дана оценка погрешностей приближенных формул, применяемых в настоящее время для расчета преобразователей накладного и проходного типа с неоднородным задающим полем. Показано, что погрешность формул Ю.М.Шкарлета[x/] первого приближения не превышает I5 % в диапазоне величин обобщенных параметров $\beta_0 = a(\omega \mu_0 \sigma)^{1/2} = 2 \div 20$, зазоров 0,05 - Ia и радиуса измерительной катушки 0,5 - Ia / a - радиус токовой катушки, ω - круговая частота тока питания, σ - электропроводность материала, μ_0 - магнитная проницаемость вакуума/. Для проходных преобразователей с базой 0 - 0,7a и диаметром измерительной катушки 0,5 - Ia в диапазоне обобщенных параметров 2 - 30 формулы В.Г.Герасимова и Л.А.Чернова[xx/] дают погрешность в случае неферромагнитных материалов до I3 %, а для ферромагнитных - до 70 %.

Повышение точности расчетов, а также расширение диапазона использования приближенных формул для анализа сигналов вихретоковых преобразователей достигается за счет разложения в ряд Маклорена стоящего под знаком интеграла коэффициента реакции или экранирования металла с последующей переменой мест процессов суммирования и интегрирования. После строгого выполнения операций интегрирования и вычисления производных

---

x/ В.С.Соболев, Ю.М.Шкарлет, Накладные и экранные датчики, Наука, 1967.

xx/ В.Г.Герасимов, Л.А.Чернов, "Дефектоскопия" № 5, I965 г., стр. 47.

получается ряд, каждый член которого состоит из сомножителей, отдельно характеризующих влияние металла, геометрические размеры изделия и конструкцию преобразователя. Для неферромагнитных материалов при обобщенном параметре β_0 более 7 ряды достаточно быстро сходятся, что позволяет получить простые и удобные для инженерных расчетов формулы. Указанным методом получены, в частности, формулы:

$$E_\varphi = \frac{J\omega\mu_0}{2\pi} f(P)\left\{\frac{\sqrt{2}\,f'(P)}{\beta_0 f(P)} - j\left[1 - \frac{\sqrt{2}\,f'(P)}{\beta_0 f(P)}\right]\right\}, \qquad (1)$$

для вторичного электрического поля накладной катушки, расположенной над неферромагнитным полупространством, где

$$f(P) = \left[\frac{2-P^2}{P}K(P) - \frac{2}{P}E(P)\right],\quad f'(P) = h'P\left[\frac{2-P^2}{2(1-P^2)}E(P) - K(P)\right],\quad P = \left[\frac{h^2}{2b}+1\right]^{-1/2}$$

$h' = h/a$ – относительный зазор, J – ток катушки, $K(P)$, $E(P)$ – эллиптические интегралы I-го и 2-го рода;

$$U_{в.н.п.н.} = \frac{j\pi z'^2(1+z'^2)^{-3/2}}{2(\rho')^{1/2} f(P)}\left[\frac{2\mu'}{kz}\cdot\frac{I_1(kz)}{I_0(kz)} - 1\right], \qquad (2)$$

для вносимого относительного напряжения наружного проходного преобразователя;

$$U_{в.н.п.в.} = \frac{j\pi\rho'^{3/2}(1+z)^{-3/2}}{2z_1'^2 f(P)\left[1 + \frac{2\mu' K_1(kz_1)}{kz_1 K_0(kz_1)}\right]} \qquad (3)$$

для вносимого относительного напряжения внутреннего проходного преобразователя и

$$U_{отн.з.} = \frac{j\pi\mu'\rho'^{3/2}(1+z^2)^{-3/2}}{2kz_1 f(P)\left\{\left[\frac{kz_1}{2}K_0(kz_1) + \mu' K_1(kz_1)\right]I_0(kz) + K_0(kz)\left[\mu' I_1(kz_1) - \frac{kz}{2}I_0(kz_1)\right]\right\}} \qquad (4)$$

для относительного напряжения наружного проходного экранного преобразователя,

где $z' = \frac{z}{a}$ – относительный наружный радиус изделия; $z_1' = \frac{z_1}{a}$ – относительный внутренний радиус изделия; $k = (j\omega\mu_0\mu'\sigma)^{1/2}$, $\ell' = \frac{\ell}{a}$ – относительная база проходного преобразователя; $\rho' = \frac{\rho}{a}$ – относительный радиус измерительной катушки; μ' – относительная магнитная проницаемость вещества, $I_0(kz)$, $I_1(kz)$, $K_0(kz)$, $K_1(kz_1)$ – модифицированные функции Бесселя I-го и 2-го рода.

В результате вычислений показано, что реакция металла в случае контроля проходными преобразователями с неоднородным задающим полем, подобна реакции металла при контроле проходными преобразователями с однородным задающим полем. Это позволяет часть выводов, полученных Н.М.Родигиным [x/] для преобразователей типа длинного соленоида, перенести на проходные преобразователи двухвитковой конструкции. Применительно к контролю изделий из ферромагнитных материалов в слабых полях /менее 10 % от коэрцитивной силы/ экспериментально показаны возможности и диапазон применения для расчетов накладных, накладных экранных и наружных проходных преобразователей начальной магнитной проницаемости вещества ферромагнитного изделия.

Исследование измерительных систем преобразователей

С целью создания унифицированных агрегатных устройств для контроля дефектов, толщины и смещений методом вихревых токов в работе исследованы вопросы количественной оценки и сравнения

---

x/ Родигин Н.М., Коробейникова И.Е. Контроль качества изделий методом вихревых токов, Машгиз, 1958.

характеристик преобразователей разного типа, включенных в амплитудные, фазовые и амплитудно-фазовые схемы измерения. Учитывая, что подавляющее большинство вихретоковых приборов дефектоскопии, толщинометрии и виброметрии работает при значениях обобщенного параметра $\beta = a(\omega \mu_0 \mu' \sigma)^{1/2}$ более 7 /для увеличения абсолютной чувствительности, снижения инерционности, упрощения схемных решений и т.п./, расчет проводился только для указанной области β. Это позволило выразить амплитуду A, фазу φ, амплитудные $\frac{\partial A}{\partial \mu'}\mu' / \frac{\partial A}{\partial \sigma}\sigma$; $\frac{\partial A}{\partial t_1}t_1 / \frac{\partial A}{\partial \sigma}\sigma$, фазовые $\frac{\partial \varphi}{\partial \mu'}\mu' / \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma}\sigma$; $\frac{\partial \varphi}{\partial t_1}t_1 / \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma}\sigma$ и амплитудно-фазовые $\frac{\partial U}{\partial \mu'}\mu' / \frac{\partial U}{\partial \sigma}\sigma$; $\frac{\partial U}{\partial t_1}t_1 / \frac{\partial U}{\partial \sigma}\sigma$ характеристики преобразователей накладного, накладного экранного, проходного внутреннего, проходного наружного и проходного экранного типа через единые обобщенные параметры μ'/β, $\frac{\mu'}{\chi = 2(\omega \mu \sigma)^{1/2}}$, $t_1(\omega \mu \sigma/2)^{1/2}$ и сомножители, определяющие влияние зазора либо радиуса изделия / t_1 – толщина стенки изделия/.

Показано, что для всех типов рассмотренных вихретоковых преобразователей /$\beta, \chi > 7$/ функциональная зависимость сигнала от свойств металла в первом приближении определяется формулами, характеризующими коэффициент реакции или экранирования исследуемой среды независимо от конструкции полезадающей системы. Влияние длины и ширины катушек может быть учтено с помощью постоянных коэффициентов, не зависящих от величины β и χ. Установлено, что при контроле в слабых полях при β, χ более 7 амплитудные, фазовые и амплитудно-фазовые характеристики, определяющие чувствительность прибора к магнитной проницаемости и электропроводности материала изделий с достаточно большой толщиной стенки, для накладного, проходного внутренне-

го и проходного наружного преобразователей одинаковы. Для экранных преобразователей накладного и проходного типа, а также для накладного измерителя толщины с односторонним подходом амплитудная, фазовая и амплитудно-фазовая характеристики, определяющие соотношение чувствительностей к μ' и σ, стремятся к - I при $t_1(\omega\mu\sigma/2)^{1/2} > 2$.

Для всех рассмотренных типов вихретоковых преобразователей показана целесообразность осуществления контроля физических свойств материалов на базе фазовых и амплитудно-фазовых измерительных схем, позволяющих существенно снизить влияние колебаний величины зазора или коэффициента заполнения. Измерение же смещений, вибраций, толщины нетокопроводящих покрытий и радиуса цилиндрического изделия желательно проводить с высокочастотными амплитудными схемами регистрации, дающими достаточно эффективную отстройку от влияния электрических и магнитных свойств материала изделия. Показано, что амплитудно-фазовые схемы измерения следует применять только в том случае, когда амплитудные и фазовые характеристики преобразователей еще не достигли своих предельных значений.

Аналитические выражения амплитуды, фазы и характеристик чувствительности преобразователей накладного, проходного внутреннего, проходного наружного, накладного экранного и проходного экранного типа позволили количественно оценить не только величину выходного сигнала, но и меру подавления мешающего фактора при использовании амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых схем измерения.

Преимущество амплитудно-фазовых схем измерения вносимого напряжения вихретоковых преобразователей различного типа перед фазовыми и амплитудными схемами заключается в возможности

подавления влияния мешающего фактора за счет изменения характеристик чувствительности. Выбор фазы опорного напряжения позволяет уменьшить влияние зазора и радиуса изделия в десятки раз, помогая тем самым значительно расширить область применения дефектоскопов и толщиномеров. В работе даны формулы, позволяющие заранее определять необходимый сдвиг между опорным и измерительным напряжениями, при котором в заданной степени осуществляется отстройка от избранного неконтролируемого параметра. Проведен анализ резонансных схем измерения, позволяющих увеличивать пропорционально добротности контура абсолютную чувствительность накладного преобразователя к исследуемому параметру и подавлять за счет расстройки контура влияние неконтролируемого фактора.

Недостатком амплитудно-фазовых и резонансных схем измерения параметров вихретоковых преобразователей является достаточно узкий диапазон их настройки. Замена материала и типоразмера изделия, изменение физических свойств объекта контроля во времени требует их обязательной подстройки. Диапазон регулировки фазы опорного напряжения, необходимый для надежной отстройки от мешающего фактора, согласно проведенным расчетам и экспериментам для всех рассмотренных типов вихретоковых преобразователей не превышает 20^{0}.

Исследование полезадающих систем преобразователей

Познание законов распределения поля на участке контроля помогает повысить разрешающую способность электромагнитных приборов дефектоскопии, толщинометрии и виброметрии.

Анализ поля электрической катушки конечных размеров показал, что по сравнению с витком увеличение длины катушки или ее

ширины при неизменном внутреннем радиусе приводит к заметному расширению диаграммы направленности задающего поля. Сужение диаграммы происходит лишь в случае уменьшения внутреннего радиуса катушки.

Существенное влияние на формирование поля в зоне контроля оказывают цилиндрические и плоские торцевые экраны. Приводятся расчеты, показывающие распределение вектор-потенциала поля при различных зазорах между экранами и витком. Количественно показано, что применение торцовых плоских и наружных цилиндрических экранов дает эффект создания однородных полей между экраном и витком и существенно ослабляет поле за экраном. Это позволяет в значительной степени устранить одновременно два основных мешающих фактора - концевой эффект и влияние поперечного смещения изделия в приборах дефектоскопии и толщинометрии. Получены приближенные выражения распределения поля, когда плотность намотки витков однослойной катушки пропорциональна

$$z_0^2/\ell^2 \,,\quad exp(0{,}5\, z_0/\ell) \,,\quad ch(z_0/\ell) \,,$$

где ℓ - длина катушки, а z_0 - расстояние по оси от середины катушки до точки наблюдения.

Перспективный метод создания задающих локальных электромагнитных полей необходимой конфигурации рассмотрен для случая использования токопроводящих вращающихся или неподвижных экранов с отверстиями заранее выбранных размеров и ориентации. Подобные устройства не имеют недостатков проходных преобразователей, связанных со значительной сложностью обнаружения протяженных по изделию дефектов, определением координат дефекта по периметру и т.п. Они не требуют индукционных узлов передачи,

применяемых в приборах с вращающимися накладными преобразователями. Локальное задающее поле создается вращающимися или неподвижными цилиндрическими экранами с щелью, расположенными между задающей и измерительной катушками проходного преобразователя. Проведенные исследования показывают, что с увеличением расстояния от щели диаграмма направленности задающего поля ассимптотически приближается к случаю поля диполя, помещенного в щели. Уменьшение ширины щели имеет оптимальный предел не только с точки зрения интенсивности проникающего поля, но и локальности его формирования, связанного с проявлением эффекта близости токов, оттеняющих щель. С увеличением частоты тока питания и электропроводности материала экрана улучшаются условия формирования щелью локального поля. Рост частоты также имеет свой оптимальный предел.

Эффект движения объекта при электромагнитных методах испытаний

В связи с необходимостью контроля дефектов, толщины и смещений изделий в условиях высокоскоростных автоматических линий производства и поточных технологических испытаний, крайне актуальной становится проблема исследования влияния скорости движения изделия на режимы настройки и параметры входных преобразователей приборов электромагнитного контроля.

Первый основной случай неразрушающего контроля, характерный для процессов вихретоковой виброметрии, связан с аксиальным смещением пластины относительно плоскости накладного и накладного экранного преобразователей. В работе проведен теоретический анализ данного случая, исходя из уравнений Максвелла для медленно движущихся тел и сред. При движении пластины толщиной t, приближенные формулы коэффициента реакции металла jP

для накладного преобразователя и коэффициента экранирования S для экранного преобразователя имеют вид

$$jP_1 \approx \frac{J\left[1-\ell^{t_1'(\theta_1-\theta_2)}\right]\ell^{-3h'}}{\frac{1,5\mu'-\theta'}{1,5\mu'+\theta'}-\frac{1,5\mu'-\theta_2}{1,5\mu'+\theta_2}\ell^{t_1'(\theta_1-\theta_2)}}, \qquad (5)$$

$$S \approx \frac{1,5j\mu'(\theta_2-\theta_1)\ell^{t_1'(\theta_1+1,5)}}{U(0,0)\left[(1,5\mu'+\theta_2)(1,5\mu'-\theta_1)-\ell^{t_1'(\theta_1-\theta_2)}(1,5\mu'-\theta_2)(1,5\mu'+\theta_1)\right]}, \qquad (6)$$

где $\alpha_0=\frac{V_z}{a\omega}$, V_z – линейная скорость движения пластины, $t_1'=\frac{t_1}{a}$, $\mu=\mu_0\mu'$,

$$\theta_1=0,5a\sigma\mu V_z-a\left[(0,5\sigma\mu V_z)^2+j\omega\mu\sigma+2,25/a^2\right]^{1/2},$$
$$\theta_2=0,5a\sigma\mu V_z+a\left[(0,5\sigma\mu V_z)^2+j\omega\mu\sigma+2,25/a^2\right]^{1/2},$$

$U(0,0)$ – напряжение экранного преобразователя без металла.

Результаты анализа основных случаев движения ферромагнитной и немагнитной пластины, а также полупространства показывают, что с увеличением скорости смещения в зависимости от направления движения на комплексной плоскости происходит смещение и деформация годографа напряжений накладного и накладного экранного преобразователей. В случае приближения металла с ростом скорости движения происходит монотонное уменьшение до нуля реактивной и активной составляющих полного напряжения катушки, при удалении – реактивная составляющая увеличивается вдвое, а активная после некоторого начального увеличения стремится к нулю. Аналогичным образом происходит изменение комплексного напряжения и в случаях испытания движущихся ферромагнитных изделий.

На основании полученных теоретических результатов предложен и экспериментально проверен новый измеритель скорости

вибросмещений экранного типа. Выходной сигнал велосиметра характеризует скорость смещения пластины независимо от ее статического расположения относительно обеих катушек накладного экранного преобразователя. Это выгодно отличает его от известных систем измерения виброскоростей. Определены условия оптимального режима питания экранного велосиметра.

Второй основной случай, встречающийся в практике эксплуатации приборов неразрушающего контроля, связан с аксиальным движением прутка, тоннеля или трубы внутри и вне проходного преобразователя. Решение исходного дифференциального уравнения с помощью интегрального преобразования Фурье дает следующие результаты для вторичного вектор-потенциала поля наружного и внутреннего преобразователя проходного типа:

$$A_{\vartheta_{в.н.п.}} = \frac{\mu_0 J a}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\mu' |\lambda| I_0(|\lambda| z) I_1(q_{в_2} z) - q_{в_2} I_1(|\lambda| z) I_0(q_{в_2} z)}{\mu' |\lambda| K_0(|\lambda| z) I_1(q_{в_2} z) + q_{в_2} K_1(|\lambda| z) I_0(q_{в_2} z)} K_1(|\lambda| a) K_1(|\lambda| \beta) e^{-j\lambda z} d\lambda, \quad (7)$$

$$A_{\vartheta_{в.в.п}} = \frac{\mu_0 J a}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\mu' |\lambda| K_0(|\lambda| z_1) K_1(q_{в_2} z_1) - q_{в_2} K_1(|\lambda| z_1) K_0(q_{в_2} z_1)}{\mu' |\lambda| I_0(|\lambda| z_1) K_1(q_{в_2} z_1) + q_{в_2} I_1(|\lambda| z_1) K_0(q_{в_2} z_1)} I_1(|\lambda| a) I_1(|\lambda| \beta) e^{-j\lambda z} d\lambda, \quad (8)$$

где $$q_{в_2}^2 = j\omega\mu\sigma + \lambda^2 - j\mu\sigma\lambda V_z,$$

$A_{\vartheta_{в.н.п.}}$, $A_{\vartheta_{в.в.п}}$ – соответственно вектор-потенциал вторичного поля наружного и внутреннего проходного преобразователя.

Результаты приближенных вычислений формул были проверены экспериментальным путем. Установлено, что как для наружных, так и для внутренних проходных систем измерения эффект влияния скорости движения изделия растет с увеличением базы преобразователя. При смещении неферромагнитного образца в направле-

нии от генераторной катушки к измерительной с ростом скорости действительная и мнимая составляющие относительного напряжения сначала увеличиваются, затем достигают максимума и начинают убывать, причем активная составляющая достигает максимума быстрее, чем реактивная. При движении образца в обратном направлении пропорционально скорости движения происходит одновременное уменьшение и активной и реактивной составляющих напряжения. В пределе эффект движения приводит, как и в случае увеличения обобщенного параметра β_0, к уменьшению до нуля вносимых составляющих. Для более сложных случаев анализа влияния скорости движения ферромагнитного цилиндра и трубы в работе даны упрощенные аналитические выражения, справедливые при $\alpha = \frac{V_z}{a\omega} < 5$. Показано, что изменение годографа вносимого напряжения при контроле труб с учетом скорости качественно происходит как и в случае неподвижного изделия, если не учитывать смещение кривой, соответствующее случаю движения прутка.

Представление об изменении поля нити с переменным током, расположенной над движущейся параллельно ей ферромагнитной пластиной, позволяет дать физическую интерпретацию явлений, происходящих при смещении преобразователей различных конфигураций. Полученные аналитические выражения показывают, что искажение поля нити E_y за счет эффекта движения пластины происходит соответственно увеличению линейной скорости и уменьшению частоты тока питания

$$E_y = \frac{j\omega\mu_0 J}{4\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\left[e^{-\lambda z} + e^{\lambda(z-2h)}\frac{\left\{\left[1-\left(\frac{\mu'\lambda}{q_0}\right)^2\right]\left(e^{-2q_0 t_1}-1\right)e^{-j\lambda x}\right\}}{\left\{\left(1+\frac{\mu'\lambda}{q_0}\right)^2-\left(1-\frac{\mu'\lambda}{q_0}\right)^2 e^{-2q_0 t_1}\right\}}\right]\frac{d\lambda}{\lambda} \qquad (9)$$

Третий основной случай, широко распространенный в практике электромагнитного контроля, связан с движением изделия параллельно плоскости преобразователя. С помощью двойного преобразования Фурье в работе получено строгое решение задачи по определению годографа напряжения накладного $U_{н.п.}$ и накладного экранного $U_{н.э.п.}$ преобразователей прямоугольной формы, движущихся параллельно плоскости токопроводящей пластины со скоростью V_x.

$$U_{н.п.} = \frac{2\mathcal{J}j\omega\mu_0}{\pi^2}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\left\{\frac{\sin^2 c\ell \sin^2 d_1\ell}{q_1 c^2}\left[\ell^{-q_1 z} + \frac{(1-y^2)(\ell^{-2q_2 t_1}-1)\ell^{q_1(z-2h)}}{(1+y)^2-(1-y)^2\ell^{-2q_2 t_1}}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{\sin^2 d_1\ell \sin^2 c\ell}{q_1 d^2}\left[\ell^{-q_1 z} + 2\,\frac{(y_1^2-1)sh\,q_3 t_1 - y(A+B)}{(y_1+1)^2\ell^{q_3 t_1}-(y_1-1)^2\ell^{-q_3 t_1}}\,\ell^{q_1(z-2h)}\right]\right\} dc\,dd_1 ; \qquad (10)$$

$$U_{н.э.п.} = \frac{2\mathcal{J}j\omega\mu_0}{\pi^2}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\left\{\frac{\sin^2 c\ell \sin^2 d_1\ell}{q_1 c^2}\left[\frac{4y\ell^{-q_1(q_2-q_1)-q_1 z}}{(1+y)^2-(1-y)^2\ell^{-2q_2 t_1}}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{\sin^2 d_1\ell \sin^2 c\ell}{q_1 d_1^2}\left[A\ell^{q_1(t_1-z)} + \frac{2y_1\ell^{q_1(q_1-q_2)-q_1 z}\left[2-(A+B)(y\,sh\,q_3 t_1 + ch\,q_3 t_1)\right]}{(1+y_1)^2-(1-y_1)^2\ell^{-2q_3 t_1}}\right]\right\} dc\,dd_1 ; \qquad (11)$$

где $q_{11}^2 = c^2 + d_1^2$; $q_{12}^2 = q_1^2 + \kappa^2$; $q_{13}^2 = q_{12}^2 - jc\mathcal{B}\mu V_x$; $y = \frac{M' q_1}{q_2}$; $y_1 = \frac{M' q_1}{q_3}$;

$$A + B = \frac{d_1}{c}\,\frac{B_1}{D_1}\left\{\frac{B_2}{B_1}\left[\left(\frac{q_1 - q_2}{q_1}\right)\left(\ell^{-q_2 t_1} - ch\,q_3 t_1\right) - q_1^{-1}q_3^{-1}\left(q_3^2 - q_1 q_2\right)sh\,q_3 t_1\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{C_2}{B_1}\left[\frac{q_1 + q_2}{q_1}\left(\ell^{q_2 t_1} - ch\,q_3 t_1\right) - \left(q_{13}^2 + q_1 q_2\right)q_1^{-1}q_3^{-1}sh\,q_3 t_1\right]\right\} ;$$

c, d_1 – переменные интегрирования, 2ℓ – длина стороны катушки преобразователя,

$$\frac{C_2}{B_1} = \frac{2y(1-y)\,\ell^{-h(q_1+q_2)-2q_2 t_1}}{(1+y)^2-(1-y)^2\ell^{-2q_2 t_1}} ;$$

$$A = \frac{d_1}{c}\,\frac{B_1}{D_1}\left[\frac{B_2}{B_1}\left(\frac{q_2}{q_3}sh\,q_3 t_1 + \ell^{-q_2 t_1} - ch\,q_3 t_1\right) + \frac{C_2}{B_1}\left(\ell^{q_2 t_1} - \frac{q_2}{q_3}sh\,q_3 t_1 - ch\,q_3 t_1\right)\right];$$

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

М115280

$$\frac{B_2}{B_1}=\frac{2y(1+y)\ell^{-h(q_1+q_2)}}{(1+y)^2-(1-y)^2\ell^{-2q_2t_1}}\cdot\frac{B_1}{D_1}=\frac{-d_1\sin\ell\,\mathrm{ctg}\,d_1\ell}{c\ell^{j\ell}};\quad \nu=\frac{V_x}{2\ell\omega}.$$

Для случая движущегося полупространства методом квадратур наивысшей алгебраической степени точности проведены численные расчеты. Результаты расчетов подтверждены экспериментально.

Напряжение преобразователей накладного и накладного экранного типа цилиндрической формы определено приближенно путем решения исходных уравнений с помощью преобразований Фурье-Бесселя. Соответствующие окончательные выражения относительного напряжения накладного $U_{н.п.}$ и экранного преобразователя $U_{н.в.п.}$ имеют вид

$$U_{в.н.п.}\approx\frac{2j}{\pi}\int_0^{\pi/2}\frac{\left[\frac{2{,}25}{\beta_0^2}\left(\mu'-\frac{1}{\mu'}\right)-j-3\mu'\nu\cos\varphi\right]d\varphi}{\frac{2{,}25}{\beta_0^2}\left(\mu'+\frac{1}{\mu'}\right)+j+3\mu'x^{1/2}\,\mathrm{cth}\,t_1'\mu'\beta_0^2x^{1/2}};\qquad(12)$$

$$U_{н.в.п.}\approx\frac{2j}{\pi}\int_0^{\pi/2}\frac{3\mu'x^{1/2}\ell^{-\frac{\sigma\mu\nu}{2}t_1d_0\cos\varphi}d\varphi}{\left[\frac{2{,}25}{\beta_0^2}\left(\mu'+\frac{1}{\mu'}\right)+j\right]\mathrm{sh}\,t_1'\mu'\beta_0^2x^{1/2}+3\mu'x^{1/2}\mathrm{ch}\,t_1'\mu'\beta_0^2x^{1/2}};\qquad(13)$$

где

$$x=\cos^2\varphi+j/\mu'\beta_0^2+2{,}25/\mu'^2\beta_0^4;\quad \nu=\frac{V_x d_\pi}{2a\omega};\quad d_\pi=\frac{0{,}3}{\mu'^{1/2}}.$$

Как для неферромагнитного, так и для ферромагнитного материала пластины при движении параллельно плоскости преобразователя с ростом скорости происходит монотонное уменьшение активной и реактивной составляющих напряжения накладной катушки. Для экранного преобразователя увеличение скорости смещения листа приводит к более быстрому исчезновению сигнала. Для него эффект движения усиливается пропорционально величине электропроводности, магнитной проницаемости и толщине листа.

Для накладных же преобразователей влияние параллельного движения пластины из ферромагнитного материала проявляется значительно слабее, чем в случае немагнитного. Анализ результатов, полученных для различных случаев неразрушающего контроля методом вихревых токов с учетом движения объекта испытаний, позволил сделать следующие обобщенные выводы:

- Эффект влияния скорости движения изделия характеризуется обобщенным параметром скорости, равным отношению величины линейной скорости объекта к радиусу /либо размеру стороны/ токовой катушки и частоте тока питания. Чем больше значения обобщенного параметра скорости, при постоянном β_0, тем сильнее влияние эффекта движения изделия.

- Изменение относительного положения годографа напряжения накладных и накладных экранных вихретоковых преобразователей при постоянной величине обобщенного параметра скорости происходит более резко при увеличении частоты тока питания и параметра β_0.

- Изменение зазора /коэффициента заполнения/, а также толщины изделия для накладных и проходных вихретоковых преобразователей в условиях динамического контроля проявляется аналогично случаям статических испытаний.

- При аксиальном движении изделия эффект влияния скорости проявляется более резко, когда направление перемещения происходит от измерительной катушки к генераторной - для проходных преобразователей, и в случае удаления плоскости - для накладных преобразователей.

- Уменьшение базы преобразователей /расстояния между задающей и измерительной катушками/ ослабляет эффект влияния скорости движения объекта контроля.

– Эффект влияния движения изделия при контроле накладными и накладными экранными преобразователями должен всегда учитываться для неферромагнитных материалов, когда произведение обобщенных параметров частоты и скорости $\alpha_0 \beta_0 = V\left(\frac{\mu_0 \sigma}{\omega}\right)^{1/2} > 0{,}3$, а для ферромагнитных материалов, когда $V(\mu\sigma/\omega)^{1/2} > 0{,}8$ и $a\sigma\mu_0 V > 1$. Для преобразователей проходного типа эффект движения изделия оказывает влияние, если обобщенный параметр скорости $\alpha_0 > 0{,}08$.

Электромагнитные методы дефектоскопии ферромагнитных изделий

Проведены экспериментальные исследования по обнаружению дефектов ферромагнитных изделий с помощью вихретоковых преобразователей наружного и внутреннего проходного, а также накладного типа. Показано, что нарушение сплошности ферромагнитного материала с учетом его формы и ориентации может изменять вектор вносимого напряжения в различных направлениях, занимающих промежуточное положение или совпадающих с направлением влияния магнитной проницаемости, электропроводности и коэффициента заполнения преобразователя /зазора/. В связи с этим делается вывод, что выявление различного типа дефектов ферромагнитных деталей методом вихревых токов с одинаковой чувствительностью не может быть обеспечено за счет выбора какого-либо одного режима настройки дефектоскопа.

Исходными величинами, определяющими конструктивное исполнение преобразователей, являются геометрические размеры дефекта – его длина, глубина, ширина и удаленность от поверхности. Последние связаны с возникающим вторичным полем и характеризуют в значительной степени его. Вторичное поле /как переменное, так

и постоянное/ имеет явно выраженный локальный характер и распространяется на расстояние, соизмеримое с размерами дефекта. Для регистрации такого поля геометрические размеры преобразователя желательно приближать к размерам дефекта. Однако практические трудности осуществления механической системы сканирования и отстройки от влияния колебаний зазора показали, что для дефектоскопии цилиндрических ферромагнитных деталей диаметром менее 30 мм, а также профильного проката малых размеров в условиях автоматизированного потока металлургических предприятий целесообразно применять дифференциальные вихретоковые преобразователи проходного типа при аксиальном намагничивании постоянным полем участка контроля. Экспериментально и аналитически показывается, что при дальнейшем увеличении диаметра изделий соотношение сигнал-шум для вихретоковых проходных систем измерения уступает в значительной мере приборам с вихретоковыми накладными и индукционными преобразователями. В то же самое время уменьшаются трудности, связанные с конструированием систем сканирования. Для изделий диаметром более 30 мм рациональным становится использование дефектоскопов с накладными вихретоковыми и индукционными градиентометрами, база и рабочий зазор которых приближены к размерам дефекта. Приведенный экспериментальный статистический анализ показывает, что при дефектоскопии труб, прутков и листов из низкоуглеродистых марок сталей чувствительность к поверхностным дефектам индукционных дефектоскопов, работающих с использованием постоянного приложенного поля, превышает чувствительность вихретоковых дефектоскопов с накладными преобразователями того же диаметра и амплитудно-фазовой обработкой сигнала. Преимуществом метода постоянного магнитного поля является также способность обнаружения

подповерхностных нарушений сплошности металла, расположенных на глубине до 10 мм. Установлено, что совокупность неконтролируемых факторов в случае применения метода вихревых токов создает значительно больший шум, чем при магнитных методах контроля, за счет существенной неоднородности электропроводности поверхностного слоя изделий прокатного производства. Кроме того, сам режим работы вихретоковых преобразователей, измерительные катушки которых находятся под воздействием первичного поля, усложняет процесс выделения полезной информации и дает дополнительные шумы.

Объективность работы дефектоскопического устройства характеризуется отношением сигнала дефекта к сигналу основного мешающего фактора. Поэтому применение преобразователей с максимально возможной абсолютной чувствительностью к градиенту магнитного поля не обязательно. В условиях поточного автоматического контроля качества продукции прокатного металлургического производства основным мешающим фактором является наклеп, поле рассеяния которого соизмеримо по величине и топографии с полем недопустимого дефекта. Учитывая это, а также обращая внимание на технологичность, простоту изготовления и удобство в эксплуатации, дается рекомендация для целей автоматического неразрушающего контроля дефектов ферромагнитных изделий в потоке использовать индукционные преобразователи. Показано, что для избежания потерь при съеме информации, выраженной через рельеф вторичных постоянных или переменных магнитных полей, а также с целью упрощения устройств для обнаружения дефектов крупногабаритных изделий, целесообразно входные преобразователи, линейные размеры которых соизмеримы с размерами дефекта, объединять в блоки, совершающие в процессе контроля механическое сканирование по-

верхности изделия в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В противном случае, как показывают проведенные на основе теоремы Котельникова исследования частотного спектра сигнала дефекта, даже при ограничении третьей гармоникой необходимо на каждые 3 мм поверхности устанавливать неподвижный преобразователь.

Основные способы отстройки от мешающих факторов - зазора и неоднородности магнитных свойств участка контроля - при магнитных методах и методе вихревых токов остаются идентичными. Они связаны с совершенствованием механических систем сканирования, градиентометрических систем преобразователей, методов введения приложенного поля и способов амплитудно-частотной обработки сигнала, получаемого со входа. Эксплуатация электромагнитных дефектоскопов значительно упрощается при введении автоматического ограничения снизу одиночного сигнала дефекта сигналом, соответствующим уровню интегрируемого шума.

Выполнен расчет сигнала, получаемого с индукционного преобразователя при считывании градиента нормальной составляющей постоянного поля рассеяния дефекта и сигнала вихретокового накладного преобразователя. Установлено, что длительность сигналов индукционного и вихретокового дефектоскопа с накладными преобразователями наиболее однозначно характеризует ширину раскрытия поверхностного дефекта, а амплитуда функционально связана с глубиной и шириной раскрытия дефекта одновременно. Поэтому для распознавания вида поверхностного дефекта рекомендуется по длительности сигнала устанавливать класс дефекта и только затем по амплитуде объективно судить о глубине дефекта данного класса ширины раскрытия.

Решение задачи об определении вида и геометрических размеров дефектов, а также об объективной разбраковке поверхностных и подповерхностных мест нарушения сплошности металла между собой может быть осуществлено с помощью предложенного объединения методов считывания постоянных магнитных полей рассеяния и переменных полей вихревых токов с использованием гармонического, временного и многоуровневого амплитудного анализа выделенного сигнала дефекта.

На основании результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан и внедрен ряд автоматических электромагнитных установок для контроля в потоке качества труб, прутков и листов. Для обнаружения поверхностных дефектов глубиной более 0,1 мм на калиброванных прутках из углеродистых марок сталей диаметром 5-30 мм разработан дефектоскоп типа ИПП-1. Прибор имеет четырехобмоточные преобразователи проходного типа, база которых не превышает 3 мм. С целью отстройки от неоднородности магнитных свойств используется аксиально направленное постоянное поле напряженностью до 2000 эрстед. Сигнал разбаланса дифференциально включенных измерительных катушек после компенсации подвергается амплитудно-фазо-частотной обработке. Выходные релейные устройства дефектоскопа связаны с системой сопровождения и сбрасывателя прутков. В связи с тем, что большинство дефектов имеет малую ширину раскрытия, что эквивалентно локальному изменению электропроводности, обобщенный параметр $\frac{r(\omega\mu\sigma)^{1/2}}{\mu}$ за счет подмагничивания поддерживается в диапазоне 3-5, при котором, согласно теоретическим выводам, достигается наилучшая отстройка от диаметра. За счет фазы опорного напряжения и фильтров производится отстройка от колебаний зазора. Дефектоскопы типа

ИПП-I длительное время эксплуатируются на Константиновском металлургическом заводе. Выборочная проверка качества 500 тонн прутков диаметром 10-22 мм показала, что прибор обнаруживает в среднем в 6 раз больше дефектов, чем контролеры ОТК. Дефектоскоп принят междуведомственной комиссией и запланирован к серийному производству.

Для контроля в потоке дефектов профильного проката /прямоугольных проводов/ разработаны промышленные образцы дефектоскопов ИНМ-I. Отличительная особенность их - двухобмоточный преобразователь прямоугольной формы, включенный в неуравновешенную мостовую схему измерения. Частота тока питания 4 кгц. Сигнал дефекта подвергается амплитудно-фазо-частотной обработке. Прибор отличается простотой, удобством и надежностью в эксплуатации. Для полых медных проводов с толщиной стенки до I,5 мм он позволяет выявлять дефекты типа трещин глубиной 0,I5 мм на наружной поверхности и 0,3 мм на внутренней. Прибор внедрен на заводе "Электросила", принят междуведомственной комиссией и рекомендован для серийного производства.

В последние годы особое внимание уделялось вопросам неразрушающего контроля качества горячекатаных ферромагнитных труб в условиях их поточного производства. В связи с этим применительно к стану 30-102 Первоуральского новотрубного завода разработана индукционная дефектоскопическая установка типа ИПН-3. Установка позволяет выявлять дефекты глубиной более 10 % от толщины стенки как на наружной, так и на внутренней поверхности трубы. Она может использоваться с тремя типами входных преобразователей - накладными вихретоковыми, индукционными двухкатушечными и индукционными однокатушечными. Вихретоковый преобразователь предназначен для контроля по-

верхностных дефектов немагнитных труб и ферромагнитных, когда необходимо разделить информацию о качестве наружной и внутренней поверхности. Дифференциальный индукционный преобразователь предназначен для контроля поверхностных и подповерхностных дефектов прутков из ферромагнитных марок сталей, а однокатушечный индукционный - для одновременного контроля дефектов по всей толще стенки ферромагнитных труб. Контроль движущихся ферромагнитных труб проводится при их циркулярном намагничивании путем пропускания через трейб-аппараты тока силой 600-2000 ампер. Сигнал дефекта с вращающихся преобразователей с помощью специального модулятора передается через бесконтактный токосъем на блоки выделения и обработки информации. Частота тока питания преобразователей 300-700 кгц. К установке ИПН-3 разработан блок анализа вида поверхностного дефекта с амплитудным, временным и счетным каналами. Временной канал измеряет длительность сигнала, давая тем самым информацию о ширине раскрытия дефекта. Амплитудный канал характеризует глубину дефекта данного класса ширины раскрытия. Счетный канал определяет длину дефекта по количеству импульсов, полученных во время прохождения места нарушения сплошности. В 1967 году дефектоскопы ИПН-3 прошли междуведомственные испытания. В настоящее время они эксплуатируются на ряде заводов. Только на Первоуральском новотрубном заводе с их помощью проконтролировано более пяти миллионов метров котельных труб.

Одна из наиболее трудных проблем неразрушающего контроля связана с созданием средств дефектоскопии холоднокатаной полосы на агрегатах поперечной резки. Разработан метод обнаружения дефектов с помощью продольного и поперечного на-

магничивания движущейся ферромагнитной полосы и считывания рельефа магнитных полей рассеяния неподвижными и вращающимися преобразователями индукционного типа. Приборы типа "Лист" предназначены для контроля качества холоднокатаных полос из низкоуглеродистых марок сталей толщиной 0,6 - 2,2 мм и шириной 1000 мм на агрегатах поперечной резки. Скорость контроля - 3 м/сек, выявляемые дефекты - раковины, крошки, рванина, вкатанная окалина, расслой, плена глубиной более 5 % от толщины листа. Дефектоскоп прошел опытно-промышленную эксплуатацию совместно с системой автоматической сортировки листов на Магнитогорском металлургическом комбинате.

Особое внимание в работе уделено вопросам разработки тест-эталонов дефектоскопов. Показаны пути создания единых рабочих и калибровочных эталонов для электромагнитных дефектоскопов прутков, труб и листов.

Толщинометрия ферромагнитных изделий методом вихревых токов

Сравнительная инерционность и неудобство эксплуатации гамма-лучевых и ультразвуковых толщиномеров в условиях поточного производства дают некоторые преимущества вихретоковым измерителям толщины. Известны результаты исследований метода вихревых токов для контроля толщины неферромагнитных материалов [x/]. В настоящей работе дается анализ амплитуды A, фазы φ, амплитудных $\frac{\partial A}{\partial t_i} t_i' \Big/ \frac{\partial A}{\partial(\mu,\sigma)}(\mu,\sigma)$, фазовых $\frac{\partial \varphi}{\partial t_i} t_i' \Big/ \frac{\partial \varphi}{\partial(\mu,\sigma)}(\mu,\sigma)$

x/ А.Л.Дорофеев, А.Л.Рубин, А.И.Никитин, Индукционная толщинометрия, Энергия, 1969.

и амплитудно-фазовых $\frac{\partial U}{\partial t_1} t_1' / \frac{\partial U}{\partial (\mu', \sigma)} (\mu', \sigma)$ характеристик накладных, накладных экранных и проходных экранных преобразователей для контроля толщины ферромагнитных материалов в диапазоне значений обобщенных параметров $\beta, x > 7$.

Аналитически показано, что для амплитудно-фазовых толщиномеров изменение фазы опорного напряжения позволяет селективно подавить влияние только одного мешающего фактора, в то время как другой продолжает оказывать существенное воздействие.

В общем случае толщинометрии ферромагнитных деталей накладным преобразователем рекомендуется применять амплитудно-фазовую схему регистрации с минимальной чувствительностью к колебаниям электропроводности материала за счет выбора фазы опорного напряжения. Отстройку от неоднородности магнитных свойств желательно выполнять с помощью постоянного приложенного поля, а от зазора – за счет механических систем сканирования и соответствующей электрической коррекции усиления сигнала.

Показано, что фазовые схемы экранных как накладных, так и проходных толщиномеров позволяют проводить контроль ферромагнитных изделий с линейной зависимостью показаний фазометра от толщины изделия и с постоянной чувствительностью независимо от абсолютного значения толщины. Они отличаются универсальностью и простотой в эксплуатации. При известной величине $\frac{\Delta\varphi}{\Delta t_1}$ показания частоты генератора соответствуют произведению магнитной проницаемости и электропроводности испытуемого материала независимо от величины зазора между изделием и катушками преобразователя.

Установлено, что максимальная чувствительность амплитуды сигнала накладного преобразователя к толщине ферромагнитного

листа находится при значениях $t_1(\omega\mu\sigma/2)^{1/2} < 0{,}4$. Зависимость фазы вносимого напряжения от толщины получается более линейной. С ростом β/μ' увеличивается максимальная чувствительность фазы к толщине, при этом большим значениям β/μ' соответствуют меньшие величины $t_1(\omega\mu\sigma/2)^{1/2}$. Преимущество фазовых схем вихретоковых толщиномеров с накладными преобразователями перед амплитудными заключается в значительно меньшей их чувствительности к колебаниям зазора.

В соответствии с расчетом максимальная чувствительность амплитуды накладного экранного преобразователя к толщине с ростом β и μ' сдвигается от больших значений $t_1(\omega\mu\sigma/2)^{1/2}$ к меньшим. Амплитуда преобразователя нелинейно изменяется с ростом толщины листа, магнитной проницаемости и параметра β. Аналитическим и экспериментальным путем показано, что при значениях обобщенного параметра $5 > t_1(\omega\mu\sigma/2)^{1/2} > 1$ фаза экранного преобразователя линейно связана с толщиной ферромагнитного листа. Чувствительность ее к толщине определяется равенством $\Delta\varphi/\Delta t_1' = 40^0\beta$. Поддерживая неизменным параметр β путем изменения частоты, можно осуществлять контроль приращения толщины стенки изделий из любых токопроводящих материалов с постоянной чувствительностью.

Установлено подобие закономерностей изменения амплитуды и фазы сигнала экранных преобразователей накладного и проходного типа.

Рассмотрение вопросов отстройки от мешающих факторов показало, что при значениях $t_1(\omega\mu\sigma/2)^{1/2} > 2$ амплитудные и фазовые характеристики накладного преобразователя $\frac{\partial A}{\partial t_1} t_1 / \frac{\partial A}{\partial(\sigma,\mu')}(\sigma,\mu')$, $\frac{\partial\varphi}{\partial t_1} t_1 / \frac{\partial\varphi}{\partial(\sigma,\mu')}(\sigma,\mu')$ монотонно стремятся к нулю, а экранных преобразователей накладного и проходного типа – к 2. Указанный

факт с учетом влияния зазора говорит о существенном превосходстве систем толщинометрии с двухсторонним подходом к ферромагнитной стенке изделия.

Показано, что наилучшие результаты измерения толщины ферромагнитного изделия в сравнительно узком диапазоне дает амплитудно-фазовый способ обработки сигнала экранного накладного преобразователя с фазовой отстройкой от колебаний электропроводности и намагничиванием до насыщения участка испытаний.

Для решения задачи создания быстродействующих средств толщинометрии ферромагнитных холоднокатаных полос в условиях потока разработан вихретоковый толщиномер с экранным накладным преобразователем типа ИТЛ-I.

Частота тока питания экранного преобразователя 3,5 кгц выбрана из соображений, чтобы обобщенный параметр $t_1(\omega\mu\sigma/2)^{1/2}$ был более двух. При этом шкала прибора получается линейной с абсолютной чувствительностью 215 градусов на миллиметр, а обобщенный параметр скорости не превосходит 0,01. Рабочий зазор между катушками датчика - 40 мм. Максимальная погрешность измерения толщины полос из стали 08КП, ст. 3 и 10КП не превышает 1,5 % от номинального размера. Прибор ИТЛ-I длительное время эксплуатируется на Магнитогорском металлургическом комбинате.

Приводится краткое описание и результаты испытаний прибора ТВТ-I для контроля толщины стенки изделий из неферромагнитных материалов электропроводностью 5-10 м/ом.мм^2 в диапазоне толщин от 2 до 7 мм. Основные данные прибора - частота I кгц, преобразователь накладной дифференциальный, схема измерения - амплитудно-фазовая.

Методы вихретоковой виброметрии

Отсутствие механического контакта с объектом, малая инерционность, простота эксплуатации и градуировки, нечувствительность к поперечным колебаниям и температуре поверхности, возможность дистанционных измерений статических и периодических смещений одновременно, малое выходное сопротивление преобразователей и т.д. выгодно отличают вихретоковые измерители вибраций от большинства применяемых в настоящее время виброметров. Предложенный принцип контроля основан на амплитудной модуляции сигнала вихретокового накладного преобразователя сигналом от изменения величины зазора во времени, при которой частота несущего сигнала питания должна значительно превышать максимальную частоту вибраций и обеспечивать отстройку от влияния толщины стенки изделия.

Анализ экспериментальных и аналитических результатов показывает, что вносимое реактивное сопротивление в случае высоких частот и $\mu' = 1$ не зависит от влияния электропроводности материала, в то время как активное сопротивление увеличивается обратно пропорционально корню квадратному из ее значения. Поэтому полное подавление влияния электропроводности следует проводить за счет увеличения частоты тока питания и применения измерительных схем, слабо реагирующих на вносимое активное сопротивление. Показывается, что увеличения абсолютной чувствительности вихретоковых измерителей смещений целесообразно добиваться за счет использования резонансных измерительных схем с высокой добротностью, дифференциальных конструкций преобразователей, уменьшения радиуса катушки, увеличения числа витков и частоты тока питания.

Особо важное значение при виброметрии методом вихревых токов приобретают вопросы линейности характеристик преобразователей. Полученные аналитические и экспериментальные данные контроля показывают, что линейность характеристик вихретоковых преобразователей смещений достигается путем включения накладной катушки в резонансный измерительный контур и расстройки последнего; за счет дифференциальной двухконтурной схемы, настроенной в резонанс при различном удалении датчика от металла; за счет увеличения диаметра катушки и добротности контура; уменьшения длины намотки; введения ферритового сердечника; использования двухобмоточной конструкции с достаточно малой величиной коэффициента индуктивной взаимосвязи.

Другой важнейшей характеристикой вихретокового виброметра является его быстродействие. Нельзя считать метод вихревых токов абсолютно безынерционным. С одной стороны следует учитывать скорость распространения электромагнитного поля в металле, с другой - переходные процессы в электрических цепях преобразователей. Характеристикой инерционности импульсного вихретокового прибора служит время становления вносимого импеданса при скачкообразном изменении задающего поля во времени. В работе получены формулы для накладного, накладного экранного и наружного проходного преобразователя, из анализа которых следует, что время становления вносимого импеданса для ферромагнитных материалов увеличивается при уменьшении величины зазора, а также с ростом радиуса преобразователя и изделия, величины электропроводности и особенно магнитной проницаемости. Для конструкционных материалов оно может находиться в пределах от долей до единиц и десятков миллисекунд.

Показывается, что для синусоидальной вихретоковой виброизмерительной аппаратуры время переходных процессов может быть уменьшено до единиц микросекунд за счет увеличения частоты тока питания и применения однокатушечных преобразователей, приближающихся по размерам к витку с возможно меньшей индуктивностью.

На основании результатов проведенных исследований разработан ряд приборов, в том числе вихретоковый велосиметр с экранным преобразователем, тахометр и измеритель пульсаций давления. Наибольшее внимание уделено обоснованию параметров схем и конструкций преобразователей вихретоковых виброметров. Выпущенный серийно виброметр ТВВ-2 нашел широкое применение в промышленности. Он позволяет измерять частоту вибрации в диапазоне 5 гц - 20 кгц и амплитуду в пределах 1-2000 мкм. Приводятся также характеристики и результаты внедрения четырехканального вихретокового виброметра типа ТВВ-8.

Краткие выводы

Основные результаты настоящей работы могут быть кратко сформулированы в следующем виде:

- На базе единого метода решения уравнений Максвелла систематизированы и обобщены инженерные методики расчета вихретоковых преобразователей накладного, проходного и экранного типа применительно к контролю качества однослойных ферромагнитных изделий в слабых полях; с помощью ЭВМ выполнены точные расчеты экранных и проходных преобразователей с неоднородным задающим полем; получены новые более точные приближенные формулы для накладных и накладных экранных высокочастотных преобразователей, а также для расчета в более широком диапазоне внутрен-

них, наружных и экранных преобразователей проходного типа с неоднородным задающим полем. Экспериментально показан диапазон применения начальной магнитной проницаемости вещества контролируемого ферромагнитного объекта при расчетах вихретоковых преобразователей накладного, наружного проходного и накладного экранного типа.

- Для накладных преобразователей и полупространства, наружного проходного преобразователя и прутка для внутреннего проходного преобразователя и тоннеля, для накладного преобразователя и ферромагнитной пластины, для накладного экранного и проходного экранного преобразователей при значениях обобщенного параметра, наиболее часто встречающихся в практике дефектоскопии, толщинометрии и виброметрии ферромагнитных изделий $(x, \beta > 7)$, с помощью единых обобщенных аргументов получены выражения и проведены сравнительные исследования амплитуды и фазы выходного сигнала, а также амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых характеристик, определяющих отношение чувствительностей приборов к измеряемому параметру и мешающему фактору. Показаны области рационального использования различного типа вихретоковых преобразователей с амплитудными, фазовыми и амплитудно-фазовыми измерительными схемами. Указана возможность создания унифицированных агрегатных устройств вихретоковых приборов.

- Проведены исследования диаграммы направленности полезадающих систем электромагнитных преобразователей в виде катушки конечных размеров с переменной плотностью намотки, витка с сердечником, с плоским и цилиндрическим экраном, а также щели в металлическом экране, расположенном между задающей и измерительной катушками проходного преобразователя.

Показаны пути создания систем, формирующих в зоне контроля однородное магнитное поле и поле в локальном объеме.

- Изучена проблема влияния скорости движения объекта контроля при испытаниях методом вихревых токов проходной, накладной и экранной системой измерения. Исследованы случаи движения ферромагнитной пластины по оси накладного и накладного экранного преобразователей; аксиального движения прутка, трубы и тоннеля относительно наружного и внутреннего проходных преобразователей; движения ферромагнитной пластины параллельно нити с переменным током, а также параллельно плоскости цилиндрического и квадратного накладного и накладного экранного преобразователей. Теоретически и экспериментально исследованы годографы напряжений различного типа вихретоковых преобразователей при движении неферромагнитного и ферромагнитного изделия, показаны общие пути отстройки и полезного использования эффекта скорости движения при неразрушающем электромагнитном контроле.

- Применительно к условиям автоматизированного поточного металлургического производства проведены сравнительные исследования метода вихревых токов и метода считывания постоянных полей рассеяния дефектов для целей дефектоскопии труб, прутков и листов из низкоуглеродистых марок сталей. Установлено, что чувствительность к поверхностным дефектам изделий прокатного производства для индукционных преобразователей, работающих в режиме постоянного приложенного поля, превышает чувствительность вихретоковых систем съема информации. При контроле дефектов ферромагнитных изделий малого диаметра и профильного сечения с размером стороны менее 30 мм для условий потока показано преимущество дефектоскопов с вихретоковыми преоб-

разователями проходного типа. Исследована функциональная взаимосвязь ширины раскрытия дефекта с длительностью сигнала индукционного и вихретокового накладного преобразователя. Показаны пути распознавания вида поверхностного дефекта на базе гармонического, временного и многоуровневого амплитудного анализа сигнала индукционного и вихретокового дефектоскопа. На основе экспериментальных и теоретических исследований разработан и внедрен в промышленность ряд дефектоскопических устройств, в том числе автоматические установки для высокоскоростного контроля дефектов ферромагнитных прутков диаметром 5 - 80 мм с вихретоковыми проходными преобразователями типа ИПП-I, дефектоскопы прямоугольных проводников с профильными проходными преобразователями типа ИНМ-I, автоматические установки для контроля качества горячекатаных труб стана 80 - 102 с индукционными и вихретоковыми накладными преобразователями типа ИПН-3, а также дефектоскопы холоднокатаных ферромагнитных полос с индукционными преобразователями типа "Лист".

- Проведены исследования метода вихревых токов с накладной, накладной экранной и проходной экранной катушкой применительно к контролю толщины ферромагнитных изделий. Показано преимущество измерителей толщины ферромагнитного материала с экранными преобразователями и амплитудно-фазовой схемой обработки сигнала. На базе теоретических и экспериментальных исследований для автоматизированного контроля толщины ферромагнитных холоднокатаных полос на агрегатах поперечной резки разработан и внедрен вихретоковый толщиномер с экранным преобразователем типа ИТЛ-I. Для контроля толстостенных нефферомагнитных труб с односторонним подходом разработан вихретоковый толщиномер ТВТ-I.

- Расширены и обобщены исследования предложенного ранее автором метода вихретоковой виброметрии с амплитудной модуляцией сигнала накладного преобразователя. Показаны пути разработки вихретоковых измерителей вибраций с повышенной чувствительностью, линейной характеристикой и малой инерционностью. На базе проведенных исследований разработаны и выпущены серийно вихретоковые виброметры типа ТВВ-2, а также созданы и внедрены в промышленность четырехканальные измерители смещений типа ТВВ-3.

Основные результаты реферируемой работы были доложены:

I. На IУ и У Всесоюзных конференциях по неразрушающим методам контроля качества изделий /г. Кишинев, 1965 г., г. Свердловск, 1967 г./.
2. На Всесоюзных семинарах по электромагнитным методам контроля /МДНТП, 1966, 1969 гг/.
3. На Всесоюзной конференции по виброметрии /г. Москва, 1965 г./.
4. На семинарах "Вибрационная техника" /МДНТП, 1964 г./.
5. На научно-техническом совещании по электромагнитным методам неразрушающего контроля /ВИАМ, 1964 г./.
6. На Всесоюзной конференции "Физика прочности металлов и неразрушающие методы контроля" /г. Минск, 1966 г./.
7. На научно-техническом совещании по проблеме контроля качества труб /г. Первоуральск, 1966 г./.
8. На научно-техническом совете НИИИН совместно с представителями ЦНИИТМАШ, МЭИ, МВТУ /г. Москва, 1969 г./.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.М.Карпов, В.В.Клюев, Производственно-технический бюллетень, 1963, № 1.
2. В.М.Карпов, В.В.Клюев, Передовой научно-технический и производственный опыт, 1963, № 31-63-336/6, стр. 3.
3. В.В.Клюев, В.М.Карпов, Н.И.Бурмистрова, Производственно-технический бюллетень, 1963, № 9.
4. В.В.Клюев, В.М.Карпов, Авторское свидетельство № 157515, 1962.
5. В.В.Клюев, В.М.Карпов, Авторское свидетельство № 152073, 1962.
6. В.В.Клюев, В.М.Карпов, Авторское свидетельство № 197503, 1962.
7. В.В.Клюев, В.М.Карпов, Передовой научно-технический и производственный опыт, № 2-64-430-13, ГОСИНТИ, стр. 9.
8. В.В.Клюев, В.М.Карпов, Приборостроение, № 9, 1964, стр.
9. В.В.Клюев, В.М.Карпов, Передовой научно-технический и производственный опыт, № 2-64-1105/28, 1964, стр. 1.
10. П.К.Ощепков, В.В.Клюев, О.С.Семенов, А.П.Дегтерев, Дефектоскопия, № 6, 1966, стр. 85.
11. П.К.Ощепков, В.В.Клюев, Л.М.Федотов, Э.Ш.Кисельгоф, Дефектоскопия, № 1, 1967, стр. 44.
12. П.К.Ощепков, В.В.Клюев, О.К.Сафронович, Е.Я.Симонова, Дефектоскопия, № 2, 1967, стр. 89.
13. В.В.Клюев, Дефектоскопия, № 3, 1967, стр. 95.
14. В.В.Клюев, В.М.Карпов, Виброметрия, № 1, 1965, стр. 57.
15. В.В.Клюев, В.М.Карпов, Вибрационная техника, № 2, 1965, стр. 9.
16. В.В.Клюев, Известия ВУЗов, Машиностроение № 12, 1965, стр. 83.

17. В.В.Клюев, Измерительная техника, № 4, 1966, стр. 25.

18. В.В.Клюев, Дефектоскопия, № 4, 1968, стр. 86.

19. В.В.Клюев, А.П.Дегтерев, О.С.Семенов, Дефектоскопия, № 2, 1966, стр. 29.

20. П.К.Ощепков, В.В.Клюев, Е.Я.Симонова, Ю.С.Калинин, Электромагнитные методы контроля, МДНТП, № 2, 1966, стр. 69.

21. П.К.Ощепков, В.В.Клюев, Э.Ш.Кисельгоф, Л.М.Федотов, Электромагнитные методы контроля, МДНТП, № 2, 1966, стр. 95.

22. П.К.Ощепков, В.В.Клюев, О.С.Семенов, А.П.Дегтерев, Электромагнитные методы контроля, МДНТП, № 2, 1966, стр. 108.

23. В.В.Клюев, Дефектоскопия, № 1, 1968, стр. 51.

24. П.К.Ощепков, В.В.Клюев, Е.Я.Симонова, Е.А.Любынский, Вопросы неразрушающего контроля качества труб при прокатке, М., 1966, стр. 34.

25. В.В.Клюев, Е.А.Любынский, О.А.Чикалова, М.И.Кунин, Вопросы неразрушающего контроля качества труб при прокатке, М., 1966, стр. 59.

26. В.В.Клюев, А.П.Дегтерев, Е.А.Любынский, Вопросы неразрушающего контроля качества труб при прокатке, М., 1966, стр. 49.

27. В.В.Клюев, Л.М.Федотов, Исследование по физике металлов и неразрушающим методам контроля, Минск, 1968, стр. 228.

28. В.В.Клюев, А.И.Делова, Электромагнитные методы контроля, М., 1969, стр. 153.

29. Л.М.Федотов, В.В.Клюев, Электромагнитные методы контроля, М., 1969, стр. 66.

30. В.В.Клюев, С.В.Мальцевский, В.Ф.Шумятский, Электромагнитные методы контроля, М., стр. 64.

31. В.В.Клюев, Измерительная техника, № 4, 1969, стр. 50.

32. В.В.Клюев, Измерительная техника, 1970 /в печати/.

33. П.К.Ощепков, В.В.Клюев, А.П.Дегтерев, О.К.Сафронович, Дефектоскопия, № 4, 1969, стр. 116.

34. В.В.Клюев, О.С.Семенов, Э.М.Кисельгоф, Тезисы У Всесоюзной конференции по неразрушающим методам контроля, стр. 121.

35. В.В.Клюев, Интроскопия, ЦНИИТЭИП, 1967, стр. 36.

36. В.В.Клюев, Интроскопия, ЦНИИТЭИП, 1967, стр. 104.

37. В.В.Клюев, Г.Г.Капелин, Дефектоскопия, № 6, 1969.

38. В.В.Клюев, А.П.Дегтерев, О.К.Сафронович, Авторское свидетельство по заявке - 1244514/25-28, 1968.

39. В.В.Клюев, Г.Г.Капелин, Авторское свидетельство по заявке № 1281168/25-28, 1968.