



Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»



Кафедра Философии

Реферат по дисциплине «История и философия науки»

на тему **«Становление, развитие и применение вихретокового  
контроля»**

Выполнил: аспирант кафедры Приборостроения  
05.11.13 - Приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий

Шкитун П.А.

Научный руководитель: д.т.н.

Сясько В.А.

Проверил: д.ф.н., проф.

Микешин М.И.

Санкт-Петербург  
2017 год

## Содержание

1. Ранние наблюдения магнитной индукции .....	1
2. Развитие техники на базе индуцирования вихревых токов в XIX веке .....	4
3. Промышленное развитие электромагнитных методик контроля .....	11
4. Практика внедрения методик электромагнитного контроля зарубежом .....	15
5. Практика внедрения вихретокового метода контроля в России .....	19
6. Применение вихретокового контроля.....	32
Список литературы .....	33

## 1. Ранние наблюдения магнитной индукции

Ни одна из разновидностей неразрушающего контроля не имеет более широкой истории технологического творчества и научно-практических работ, которую можно было сравнить с историей явления электромагнитной индукции и методов вихретокового контроля.

Электромагнитный контроль обладает одним из наиболее древних названий из всех широко распространенных методов неразрушающего контроля. Первые упоминания датированы VI веком до н.э. - Фалес Милетский писал о явлении притягивания легких предметов некоторыми материалами вроде янтаря после его натирания и магнетита, названного в честь места обнаружения Магнезии в Фессалии. В дальнейшем к явлению притягивания объектов на относительно небольшом расстоянии прочно прикрепились имя магнетизм. Объяснение явления было невозможно для ученых того времени, однако в дальнейшем принцип подобия связал явление с вращающимися притягивающимися различными шариками.

В IV веке до н.э. Демокрит описал концепцию атомарного строения материи. Его шесть принципов были перечислены Джоном Тиндалем и цитировались Робертом А. Милликаном. Согласно пятому принципу «многообразие всех вещей зависит от разнообразия их атомов, количества, размера и расположения», а значит на базе явления магнетизма возможно создание методов изучения и контроля состава и других свойств материалов, а значит и изучения окружающего мира.

В дальнейшем явление магнетизма нашло применение в навигации. В XII веке н.э. было задокументировано использование магнитного компаса в Китае. В то же время, англичанин Александр Неккам, тоже сообщил об использовании компаса, как навигационного прибора.

В 1269 году, французский ученый Пётр Перегрин (рыцарь Пьер из Мерикура) отметил магнитное поле на поверхности сферического магнита, применяя стальные иглы, и обнаружил, что получающиеся линии магнитного поля пересекались в двух точках, которые он назвал «полюсами» по аналогии с

полюсами Земли. Почти три столетия спустя сформировал теорию магнетизма, Уильям Гильберт Колчестер использовал труд Петра Перегрини и впервые определённо заявил, что сама Земля является магнитом. В 1600 году Вильям Гилберт написал книгу «De Magnete» - обширное описание 18 лет его экспериментов и его теории магнетизма. Таким образом, явление нашло ряд применений и из просто наблюдения за века обросло фундаментальной теорией.

На базе теории магнетизма стала расти теория электрического заряда. В 1663 году магдебургский бургомистр Отто фон Герике создал электростатическую машину в виде насаженного на металлический стержень серного шара, которая позволила наблюдать не только эффект притягивания, но и эффект отталкивания. В конце XVI века английский врач Уильям Гильберт назвал тела, способные после натирания притягивать лёгкие предметы, наэлектризованными. В 1729 году Шарль Дюфе установил, что существует два рода зарядов. Один образуется при трении стекла о шёлк, а другой — смолы о шерсть. Поэтому Дюфе назвал заряды «стеклянным» и «смоляным».

Понятие о положительном и отрицательном заряде в дальнейшем ввёл Бенджамин Франклин. Роберт А. Милликан в его книге «Ранние взгляды на электричество» утверждал, что не было «никаких электрических теорий» до Бенжамина Франклина, который в 1747 году отметил, что электрическая материя состоит из крайне тонких частиц, так как она может проникать в обычную материю, даже в самую плотную, так свободно и легко, что не получает заметного сопротивления. Франклин распознал два вида намагничивания и ввел термины положительный и отрицательный, чтобы различать их. Он произвольно назвал любое тело положительно намагниченным, если оно отталкивается от стеклянного стержня, который был натерт шелком, и отрицательно намагниченным, если тело отталкивается от сургуча, который был натерт кошачьим мехом. Таковы были первые определения положительного и отрицательного электрических зарядов.

## 2. Развитие техники на базе индуцирования вихревых токов в XIX веке

Электромагнитная индукция не наблюдалась и, соответственно, не было попыток её объяснения до XIX века, однако фундаментальная и повсеместно используемая теория электричества сформировалась именно в тот период. Ключевыми фигурами того времени, чей вклад является фундаментальным в формировании теории электричества, это Ганс Христиан Эрстед, Андре Мари Ампер, Джозеф Генри, Майкл Фарадей, Генрих Фридрих Ленц, Франц Е. Нейман, Герман Л. фон Гельмгольц, Уильям Томпсон и Джеймс Кларк Максвелл.

Ганс Христиан Эрстед в 1820 году отмечал, что ток сам был причиной воздействия, и что воздействие электричества проявляется во вращении, то есть, что магнит помещенный рядом с проводом, по которому протекает электрический ток, как правило, поворачивается перпендикулярно к проводу, и всегда остается в таком же положении, если магнит двигается вокруг провода. Пространство, в котором силы действуют, таким образом, может рассматриваться как магнитное поле. Открытие Эрстеда означает что «магнитные силовые линии везде под прямым углом к плоскостям, проведенным через провод, поэтому круги в каждой плоскости перпендикулярны к проводу» проходящему через центр плоскостей.

Так же исключительно важное значение имели практические работы Андре Мари Ампера. В своем первом эксперименте, Андре Мари Ампер, показал, что два эквивалентных близкорасположенных тока и направленных в противоположных направлениях нейтрализуют друг друга. Это явление имеет большое значение в создании электрической аппаратуры, поскольку становится возможной передача тока в и из любого гальванометра или другого инструмента таким образом, что не создается прямой электрической связи при прохождении тока к и от прибора. Данное явление используется для подключения инструментов к катушке-детектору или полупроводниковому детектору для обнаружения информативных сигналов магнитного поля, создаваемого вихревыми токами. Так же стоит упомянуть о том, что данный принцип является фундаментальным для работ Фарадея, а так же для работы радиосвязи.

Второй эксперимент Ампера касается изогнутых путей протекания тока. Максвелл поясняет, что один из проводов загибается множеством мелких синусоид, но так, что в каждой части своего направления он остается очень близко к прямому проводу. Это доказывает, что эффект от тока, протекающего по любой изогнутой части провода эквивалентен току, протекающему в прямой линии, соединяющей его концы, при условии, что изогнутый провод ни в какой части своего направления не находится далеко от прямой линии. Следовательно, любой малый элемент контура эквивалентен двум или более составным элементам. Однако стоит отметить, что этот основной принцип уже на сегодня, как правило, игнорируется по отношению к своему значению в обнаружении очень маленьких разрывов, которые локально искажают пути потока вихревых токов.

Третий эксперимент Ампера показал, что внешние токи и магниты не имели тенденцию к перемещению прямого проводника с током в направлении его длины.

Четвертый эксперимент показал, что сила, действующая между двумя соседними сбалансированными токовыми контурами, изменяется пропорционально квадрату расстояния между двух контуров.

В 1831, Джозеф Генри в Соединенных Штатах и Майкл Фарадей в Англии открыли электромагнитную индукцию. Фарадей, который в течение некоторого времени стремился производить электрические токи с помощью магнитных или электрических воздействий, обнаружил условия магнитоэлектрической индукции. Метод, который использовался Фарадеем в своих исследованиях, заключался в постоянном обращении к эксперименту как к средству подтверждения истинности его идей и постоянном культивировании идей под непосредственным влиянием эксперимента". Поэтому Фарадей обсуждает "его неудачи также, как и его успешные эксперименты, и его сырой идеи также как его развитые".

Метод Фарадея тесно связан с методом дифференциальных уравнений с частной производной и интеграции во всем пространстве. Он никогда не считал тела, как существующие с пустотой между ними, а расположенные на расстоянии,

и действуют друг на друга в соответствии с некоторой функцией, зависящей от расстояния. Он воспринимает все пространство как силовое поле, силовые линии обычно изогнуты в связи с тем, что они выступают из любого тела со всех сторон, их направление меняется с появлением других тел. Он даже говорит о силовых линиях, принадлежащих к телу, как и в некотором смысле, их части, таким образом, в своем действии на удаленные тела невозможно сказать, где же этого воздействия нет.

Первая форма Закона Фарадея: «Первичный контур, соединенный с гальванической батареей, с помощью которого может быть получен первичный ток, поддерживаться, останавливаться, или меняться. Вторичный контур включает гальванометр, который расположен так, чтобы первичный ток не влиял на него. Части первичного и вторичного тока являются прямыми проводниками, размещенными параллельно и близко друг к другу. Когда ток посылается через первичный контур, гальванометр из вторичного контура указывает на ток во вторичном прямом проводе, который течет в противоположном направлении. Это называется индуцированным током. Если первичный ток постоянно поддерживали, индуцированный ток вскоре исчезает, и первичный ток, кажется, не производит никакого эффекта на вторичный контур. Если теперь основной ток прекращается, вторичный ток наблюдается, в том же направлении что и основной ток. Каждый вариант первичного тока создает ЭДС во вторичной цепи. Когда первичный ток увеличивается, электродвижущая сила противоположна направлению тока. Когда ток уменьшается, электродвижущая сила в одном и том же направлении с током. Эффекты индукции увеличиваются, когда два провода сближаются. Они также увеличиваются путем формирования их в двух кругах или спиральных катушках, размещенных близко друг к другу, и еще больше, если внутри катушки размещены железный прут или пучок проводов железа". Фактически Фарадей описал принцип, на базе которого в дальнейшем был изобретен электрический трансформатор.

Этот эксперимент демонстрирует основополагающие принципы для использования намагничивания катушки в вихретоковом контроле, который

имеет потребность в изменяющемся во времени первичном токе. Преимущество близкого расположения или расстояния между катушкой намагничивания и поверхностью тестового металла также показаны. Это приводит к контролю зазора зондирующей катушки и предпочтения для высокого коэффициента заполнения катушки для вихретокового контроля охватываемой катушкой. В вихретоковом контроле также существует необходимость в импульсном или переменном первичном токе. Наконец, как преимущество, он предложил использовать ферритовые сердечники или железо в катушках вихретоковых датчиков. Вихретоковая контрольная система в начале двадцать первого века в полной мере использовала каждый из этих принципов, четко сформулированных Фарадеем в 1831 году.

Фарадей также обнаружил что, перемещая первичный контур к вторичному контуру, ток может быть вызван во вторичной цепи в направлении, противоположном к первичному току. Точно так же, Фарадей обнаружил, что перемещение вторичного контура к первичному индуцирует ток противоположный первичному току. Также, отдаление вторичного контура от первичного индуцирует ток в том же направлении, как и первичный ток. Направление тока вторичной обмотки таково, что механическое действие между двумя проводниками противоположно направлению движения, отталкивание, когда провода приближаются, и притягивание, когда они отдаляются". Эта электродвижущая сила наблюдалась Фарадеем, но было дано более систематическая трактовка Э.Х. Ленцем.

Три принципа вытекают из концепции индукции производимой движением первичного контура:

Во-первых, поляризованные и направленные вторичные токи могут быть вызваны перемещением прямого первичного тока над проводящей тестовой поверхностью,

Во-вторых, переменный ток может быть получен в проводящем вторичном контуре или тестовом материале, когда постоянный ток первичной катушки



перемещается циклически вверх или вниз или из стороны в сторону в рядом и вторичной обмоткой или проводящей тестовой поверхностью,

Третья концепция подразумевает технику индукции от движущегося первичного контура такой, что используя детектор магнитных полей постоянного тока для измерения величины вторичного тока или вихревого тока в проводящем материале, под или за движущейся первичной катушкой.

Практический пример контроля с помощью перемещения вторичного контура будет быстрое перемещение проводящего тестового материала, такого как листовой металл в прокатной мельнице, мимо стационарной тестовой катушки постоянного тока, вызывая протекание тока в материале, как при приближении, так и при отдалении от области этой локальной намагниченности. Детекторы вихретокового поля могут реагировать либо на местные разрывы, либо изменения свойств материала, которые влияют на амплитуду и распределение вихревых токов.

Фарадей также обнаружил, что ток может быть вызван относительным движением магнита и вторичного контура. Если заменить первичный контур магнитным экраном, чей край совпадает с контуром, чья сила численно равна силе тока в цепи, и чей южный полюс соответствует положительному концу цепи, то явления, производимые относительным движением этого экрана и вторичным контуром, такие же, как те, которые наблюдаются в случае с первичным контуром. Катушки из предыдущих примеров могут быть заменены постоянным магнитом при относительном движении между магнитом и исследуемым материалом при вихретоковом контроле, при условии, что может быть достигнута адекватная величина вторичного тока и скорость движения.

Максвелл сформулировал истинный закон электромагнитной индукции в следующем виде: "Общая электродвижущая сила, действующая в контуре в любом момент, измеряется скоростью убывания количества магнитных силовых линий, которые проходят через него. Интеграл времени от общей электродвижущей силы, действующей по любой круговой схеме, вместе с количеством магнитных силовых линий, которые проходят через контур, является

величиной постоянной". Эту величину "даже можно назвать фундаментальной величиной в теории электромагнетизма". Эта величина похожа на концепцию потокосцепления, измеряется произведением количества витков обмотки и общего магнитного потока, заключённого в обмотке.

Двухтомный труд Майкла Фарадея «Экспериментальные исследования по электричеству» оказал влияние на многочисленных исследователей и изобретателей в Европе и Соединенных Штатах с 1830 до конца девятнадцатого века. Это заинтересовало многих других экспериментировать с электромагнитными эффектами и развивать многие основные изобретения, такие как телеграф Морзе, телефон Белла и Эдисона, который привнёс многие улучшения в телеграфную, телефонную связи, пожарную сигнализацию и тикерную системы связи.

Влияние Фарадея на изобретателей с малой или отсутствующей научной подготовкой было очень большим, для экспериментов Фарадея не использовались сложные математические формулы. Для изобретателей, как Томас Эдисон, Фарадей, казался, мастером экспериментатором, чьи лабораторные записи передали высокий интеллектуальный азарт. Объяснения Фарадея были простыми, погруженными в дух правдивости и смирения перед природой. Для Фарадея, законы природы раскрывались через эксперимент. Таким образом, в период с 1831 по 1875, изобретения, сделанные на основе исследований Фарадея, часто были разработаны путем проб и ошибок, эмпирически шаг за шагом.

В 1834 году, Генрих Фридрих Ленц описал ЭДС соотношения между явлениями механического действия электрического тока, как определено формулой Ампера, и индукцией электрического тока относительно движения проводника. В целом, Ленц утверждает, что электромагнитное поле будет действовать так, чтобы противостоять или сопротивляться любым воздействиям, стараться изменить их интенсивность или конфигурацию. Где механическое движение вызывает изменения, механическая сила, развиваемая в рамках системы, будет выступать против изменения. Если механическое движение отсутствует, то будет наводиться ЭДС что, как правило, необходимо для

поддержания того же состояния, а именно поддерживать полное потокосцепление в системе.

На основании закона Ленца, Франц Е. Нейман в 1845 году сформулировал свою математическую теорию индукции. Составляющие для индукции токов в математической обработке, которые Ампер применял к их механическому воздействию.

Большую научную важность имеет вывод Германа Л. фон Гельмгольца. Он и Уильям Томпсон в 1847 году, работая самостоятельно, доказали, что «индукция электрических токов, открытая Фарадеем, может быть математически выведена из электромагнитных явлений, открытых Эрстедом и Ампером, с применением принципа сохранения энергии».

Джеймс Кларк Максвелл в его выдающейся двухтомной работе «Трактат об электричестве и магнетизме» попытался подытожить годы развития теории электромагнитных явлений. Он задумал и опубликовал всеобъемлющую группу взаимоотношений для электромагнитного поля, известную как уравнения Максвелла, которые математически представляют почти все настоящие знания в этой области. Замечательное достижение Максвелла по интеграции имеющихся знаний о электромагнитных контурах и полях обеспечивает основу для анализа всех основных проблем вихревых токов и электромагнитной индукции - и для большинства современных электромагнитных теорий.

Эти простые уравнения, как в интегральной, так и дифференциальной форме были получены с помощью методов Лагранжа, используя соотношения от вариационного исчисления. Решения для переменных полей также доступны для многих конфигураций полей. Представляет интерес то, что более простые методы, использующие оперативную карту, были разработаны для представления этих типов уравнений и их производных в простой форме для использования студентами инженерами. Уравнения доступны почти во всех основных учебниках по электромагнитным полям. Кельвин разработал решения уравнения Бесселя для случаев зондовых катушек и при условии функции Кельвина, с помощью которой могут быть легко вычислены простые случаи вручную или на компьютере.

С 1900 года физики и исследователи электричества и магнетизма заняли себя способами применения теории Максвелла. Тем не менее, никто не задумывался серьезно о новом законе, он будет добавлен к принципам Максвелла, с возможным исключением теории относительности Эйнштейна, которая рассматривает теорию трехмерного электромагнитного поля в четырехмерных рамках, в том числе времени.

### **3. Промышленное развитие электромагнитных методик контроля**

В 1876 Александр Грэхем Белл изобрел и запатентовал первый настоящий телефон, на базе которого в 1879 году Дэвид Э. Хьюз выполнял вихретоковые сравнительные испытания монет. В его демонстрации и отчете для Сообщества Физиков заявлено, что «если мы поместим в одну из пар катушек индуктивности любой проводник, то в этих телах возникнут электрические токи, которые воздействуют как на первичную, так и вторичную обмотки, порождая дополнительные токи, сила которых будет пропорциональна массе и удельной электропроводности. Два одинаковых шиллинга «будут полностью сбалансированы», если каждый поместить в центр катушек. «Однако если эти шиллинги в малейшей степени изношены или имеют разную температуру, мы сразу заметим эту разницу» Хьюз назвал свой аппарат «быстрый и идеальный детектор монет», который может «проверить любой сплав, мгновенно давая его электрическую величину». Каждый современный вихретоковый датчик работает по вышеописанному принципу - различия только в формах и размерах катушек, форме первичного сигнала и выборе информативных параметров.

Затем Хьюз проводил измерения электропроводности различных металлов, используя как отправную точку значение меди как 100%, создавая ряд значений, подобный величинам электропроводности, позже в 20 веке выраженным в процентах от международного стандарта на отожженную медь. Он так же провел испытания над ферромагнитными материалами, различного вида от мягкого железа до закаленной стали. Таким образом, он установил основные принципы

контроля и объяснил современные вихретоковый и магнитоиндукционный контроли.

Активный практический интерес к электромагнитным методам для сортировки металлов и поиска дефектов в результате не привел к большому числу полезных измерительных устройств вплоть до начала 20 века, поскольку возможности приборостроителей сильно ограничивали область применения данного типа приборов. Однако многочисленные разработки иной направленности, таких как электрические трансформаторы переменного тока и аналогичные индукционные машины, обеспечили основу для дальнейшей разработки и потребности изучения потерь, происходящих в материалах магнитных сердечников, используемых во всех электронных приборах.

С 1890 по 1925 было приложено множество усилий на уменьшение вихревых токов и магнитных гистерезисных потерь в многослойных стальных листовых материалах, которые чаще всего использовались в качестве сердечников трансформаторов, в частности с помощью добавления легирующих элементов, которые уменьшают электропроводность и с помощью использования более чистых сплавов железа, в некоторых случаях, направленной прокатки для достижения максимальной проницаемости и минимальных гистерезисных потерь, поскольку данные потери ограничивали возможность приложения больших мощностей и больших частот сигналов.

Множество улучшений, в том числе использование более тонких листов, ориентированных листов стали и изоляционных покрытий между листами, привели к ограничению направления потока вихревого тока, а значит повышали эффективность и частотный диапазон работы трансформаторов. Так же в ходе этих ключевых магнитных улучшений были обнаружены нежелательные эффекты напряжения механического сдавливания и напряжения в результате штамповки и резки пластин, которые, как правило, увеличивают основные потери при воздействии переменного тока, наиболее известный и трудно устранимый из которых это механические колебания под действием тока, создающие всем известный и раздражающий гул трансформаторов. Отжиг в водородной

атмосфере и другие технологии привели к превосходным свойствам листов из магнитных сплавов. Контроль других легирующих элементов, ориентирование структурных зерен и магнитных доменов использовались для разработки специальных сталей с прямоугольной петлей гистерезиса. Эти стали используются в магнитной коммутации электрических токов, в насыщающих реакторах, магнитных усилителях и многих новых электромагнитных устройствах.

Эти разработки проиллюстрировали изменения в электрической проводимости, магнитной проницаемости, ориентации зерен, анизотропии, механическом напряжении, составе сплава и содержании примесей, которые, в свою очередь, повлияли на электромагнитный отклик ферромагнитных материалов и изменили кажущуюся индуктивность и резистивные потери, измеренные намагничиванием катушек. Постоянный ток смещения для настройки кажущейся индуктивности насыщающих реакторов и магнитных усилителей для управления мощностью так же показан как средство снижения магнитной проницаемости и дифференциальной индуктивности или индуктивного сопротивления. Было так же отмечено, что многие материалы магнитных сердечников вводили нечетные гармоники в токи намагничивания или напряжения на индуктивность магнитной катушки (или во вторичной обмотке сердечника находящейся не под напряжением). Высокая чувствительность гармонических сигналов к состояниям материала и механической нагрузке была известна и намеренно избегалась, когда это было возможно, однако теперь именно на этих сигналах и построены вихретоковые методы контроля.

Эти разнообразные эффекты хорошо известны проектировщикам электротехнического оборудования на рубеже веков, с тех пор стали возможными методики контроля или считывания сигналов вихретокового неразрушающего контроля. Однако в целом, доступные в продаже листы электротехнической стали с высокой проницаемостью, не подходят для вихретокового контроля, потому что их вихретоковые потери очень малы. Для их оценки, электромагнитный

индукционный контроль реагирующий прежде всего на эффект гистерезиса, в том числе эффект высших гармоник, может оказаться более полезным.

В конце 19 века синусоидальные колебания напряжения и тока в электроэнергетической системе переменного тока создали новые трудности в анализе электрических цепей, в сравнении с анализом ранних силовых электроэнергетических систем постоянного тока Томаса А. Эдисона. Детальные решения уравнений Максвелла были необходимы для векторных исчислений.

Чарльз Протеус Штейнмец разработал более упрощенный метод анализа с использованием вращающихся отрезков, которые он назвал векторы для представления синусоидальных величин. Так как отрезки поворачиваются относительно одного конца (находящего в начале координат), их вертикальные проекции отмечаются на оси ординат синусоидальных волн, когда эти вертикальные проекции строились как функция времени. Совместно с методом представления сопротивления на комплексной плоскости, эти величины векторов сводят решение установившегося состояния переменного тока к простой алгебре и тригонометрии, а не к интегральному исчислению.

Позже, после Второй Мировой войны, эти методы анализа сигналов на комплексной плоскости широко использовались в анализе вихретокового контроля, после их четкой формулировки Фридрихом Форстером. Соответствующие диаграммы сопротивления на комплексной плоскости и на дисплее осциллографа обеспечивают прямые способы для интерпретации многих изменений наблюдаемых в вихретоковом неразрушающем контроле. Эти двумерные диаграммы импеданса, с индукционным реактивным сопротивлением в качестве ординаты и резистивным (потеря энергии) значением в качестве абсциссы, позволяет отображение множества различных условий испытаний и прогнозирования различных эффектов, наблюдаемых в электромагнитных испытаниях одночастотного переменного тока техниками и операторами испытания, которые не знают вычислений. И на данный момент применение этих диаграмм на комплексной плоскости стали традицией для специалистов в области дефектоскопии.

#### **4. Практика внедрения методик электромагнитного контроля зарубежом**

Вихретоковые измерения заключаются в сравнении получаемого сигнала с эталонным, для чего применяется прибор компаратор. Многочисленные электромагнитные индукционные или вихретоковые компараторы были запатентованы в США в период с 1925 до конца Второй Мировой войны в 1945 году. Многие предлагаемые простые катушки компаратора, в которых были размещены круглые стержни или другие объекты испытания, порождали простые изменения амплитуды тестовых сигналов или разбалансировали простые мостовые схемы.

Почти во всех случаях, особенно там, где были задействованы ферромагнитные тестовые материалы, с такими инструментами невозможно было произвести количественный анализ тестовых объектов, ни анализ свойств или целостности. Часто возникали трудности при воспроизведении результатов испытания. Многие простые компараторы работают при 60Гц от 110В цепей переменного тока, используя обычные инструменты, такие как вольтметр, амперметр, ваттметр, а иногда и фазометров. В других случаях, использовались схемы моста Уитстона, чтобы сбалансировать параметры сравнения испытания и большей чувствительности при различении сигналов. По большей части, многие из первых систем компаратора недолго использовались и мало получили признания в промышленности. Для сравнения, несколько таких достижений, спонсируемых основными отраслями промышленности или настойчивыми творческими изобретателями, которые искали поддержку и создали свою собственную компанию, выжили и использовались в модернизированном виде в промышленности США.

Развитие электромагнитного индукционного контроля для круглых прутьев, труб, заготовок и других изделий металлургической промышленности продолжалось в США. Чарльз В. Берроуз, Карл Кинсли и Теодор Зушлаг были среди пионеров в Magnetic Analysis Corporation. Гораций Г. Кенерр, Сесил Фэрроу и Альфред Р. Шарпис получили основные патенты в Republic Steel and Tubes. Их разработки были расширены и продолжены в Electromechanical Research Center of



Republic Steel, Сесилом Фэрроу, Уильямом Арчибальдом Блэком, Уильямом С. Хармоном и И.Г. Орельяном. Автоматизированный электромагнитный контроль был применен в больших масштабах на производственной линии контроля труб, образцов и заготовок.

В компании General Electric первая очередь изобретательских разработок была начата Джеймсом А. Сэмсом, Чарльзом Д. Мориарти и Х.Д. Рупом. Росс Ганн из военно-морской научно-исследовательской лаборатории США разработал новую форму зонда катушки системы намагничивания с двумя приемными катушками маленького диаметра, перемещенных вдоль диаметра намагничивающей катушки. Это был ранний пример использования намагничивающей катушки одного размера, и совсем другого размера приемных катушек в неконцентрическом положении.

Быстрому технологическому развитию во многих областях до и в течение Второй мировой войны способствовали как спрос на неразрушающий контроль, так и развитие передовых методов испытаний. Радиолокационные и гидроакустические системы сделали приемлемым просмотр тестовых данных на экранах электронно-лучевых трубок и осциллографах. Развитие электронных приборов и магнитных датчиков, используемых как для размагничивания кораблей, так и для приведения в действие магнитных мин, привело к возрождению деятельности. После войны, такие разработки, как эхо импульсный ультразвуковой дефектоскоп Флойда Фаерстоуна для ультразвукового контроля и передовые вихретоковые и магнитоизмерительные системы Форстера, стали доступны для промышленных систем неразрушающего контроля. Эти системы открыли новые аспекты для неразрушающего измерения свойств материалов, локализации и определения относительных размеров несплошностей.

Электронные аппараты на основе вакуумных электронных ламп, заполненных газом, приближались к пику своего развития. Эти разработки позволили легко сконструировать осциллографы переменной частоты и блок питания для намагничивания катушек в системе вихретокового контроля. Они также позволили линейно усилить кратковременное напряжение или сигналы тока

до уровня достаточного для систем отображения, графических и систем пространственной регистрации, для функционирования сортировочных ворот, автоматизированного сканирования и механизации погрузочно-разгрузочных работ в ходе контроля. Аэрокосмическая и атомная промышленности быстро развивались и предъявляли особые требования к чувствительности и согласованности приборов, используемых для оценки материалов и возможности повышения надежности. Эти отрасли были главными спонсорами исследования для продвижения всех форм неразрушающего контроля. Тем не менее, государственная поддержка вихретоковых приборов оказалась значительно меньше, чем для других областей неразрушающего контроля, пока технология Фридриха Форстера не была внедрена в этой стране.

Введение Форстером технологичного, стабильного количественного тестового оборудования и практических методик для анализа количественных тестовых сигналов на комплексной плоскости было важным фактором, способствующим быстрому развитию и принятию электромагнитного индуктивного и вихретокового контроля с 1950 по 1965 годы в США.

Во время Второй мировой войны, его знания использовались в военно-морских боевых действиях, в частности, в связи с использованием магнитных мин. В конце войны, после периода оккупации Франции, Форстер восстановил свои отчеты и начал дальнейшее развитие электромагнитных измерительных приборов.

К 1950 году он разработал точную теорию для основных типов вихретокового контроля, включая как абсолютную, так и дифференциальную или компараторную систему контроля и систему для датчика или резонансной катушки, используемых для тонких листов и протяженных поверхностей. Были проведены кропотливые калибровочные испытания с этими системами катушек и моделями из ртути (которыми можно было моделировать несплошности, путем вставки кусочков изолятора). Каждый опыт был подтвержден точным решением дифференциальных уравнений Максвелла для различных пограничных условий, связанных с катушками и опытным образцом, по крайней мере, для

симметричных случаев, таких как круглые плитки, трубы и плоские листы, где было возможно такое математическое интегрирование.

Дальнейшие исследования были проведены для нелинейных характеристик отклика ферромагнитных тестовых образцов. Были разработаны методы, использующие очень низкие контрольные частоты (5Гц), гармонический сигнал, компараторы на различных уровнях намагниченности и точные мостовые схемы. В большинстве случаев Форстер заменил измерение индуктивности или импеданса намагничивания катушки более точной методикой, измерения отклика с ненагруженной вторичной обмотки, соединенной с контрольным образцом.

Масштаб и глубина этих научных исследований не были поддержаны ни одной лабораторией США, как спонсируемыми правительством, так и работающими независимо. Обширными публикациями Форстер сделал результаты этого исследования доступными для мира технического персонала. Его вклад почти всей теории и технологии электромагнитной индукции и технологии вихретокового контроля в первом издании Руководства по неразрушающему контролю американского общества неразрушающего контроля обеспечили средства для обучения тысяч сотрудников неразрушающего контроля теории, технологии, оборудованию и интерпретации вихретоковых испытаний. Это комплексное представление затем было использовано во всем мире, чтобы обновить технологию вихретокового контроля.

Уникальные разработки в новой лаборатории Форстера в Ройтлингене ФРГ, стали известны в США. Еще более значительным было передача технологий Форстера американским производствам и распространение оборудования неразрушающего контроля с 1952 года.

В течение следующих нескольких лет, большее количество технологий Форстера были переданы в Магнафлюкс, чем персонал под руководством Гленна Л. Макклерга стал квалифицированным в области проектирования и производства различных инструментов Форстера, а затем продавали эти системы электромагнитного индукционного контроля на всей территории США. Сотрудничество между Форстером и Корпорацией Магнафлюкс длилось,

возможно, лет десять, в течение которых, был достигнут большой прогресс и в немецкой лаборатории и в США.

Широкая организация производств многих видов оборудования неразрушающего контроля и продажа своих услуг в США привели к успеху в технологиях контроля и расширили спектр применения. Большинство из этих инструментов были обновлены на базе полупроводниковых и интегральных микросхем. Многие инструменты в 21 веке работают с абсолютными или дифференциальными датчиками на катушках, охватывающих катушках, внутренних катушках и различных специальных катушках, и микросхемах – многие, из которых Форстер, описал в первом издании Руководства по неразрушающему контролю.

Самобалансирующиеся и саморегулирующиеся приборы, которые устанавливают опорные точки путем помещения датчиков на стандартные тестовые материалы или образцы, доступны в нескольких случаях, использующих разработки Уго Либби и других разработчиков. Конструкции датчиков, основанных на цифровом компьютерном анализе распределения вихревых токов в однослойных или многослойных листовых материалах, стали возможными из новаторской работы в национальной лаборатории Оук-Ридж. Специальные датчики с отдельными катушками, внутренними магнитными экранами и другими усложнениями были разработаны для обнаружения трещин и специальных применений. Также начали применять цифровые дисплеи для тестовых сигналов.

## **5. Практика внедрения вихретокового метода контроля в России**

Впервые электромагнитные методы неразрушающего контроля были применены в России еще в позапрошлом веке. Как и многие другие, своему появлению он обязан военной промышленности. Именно на Тульском Императорском военном заводе и была применена установка электромагнитного баланса. Введение новой технологии позволяло значительно повысить выявление бракованных оружейных стволов до проведения огневых испытаний и

отбраковывать до 65% изделий из общего количества брака. Основа теории метода магнитного контроля была заложена в 30-х годах XX века. В ее основу легли работы выдающихся ученых того времени Януса Р.И., Аркадьева В.К., Вонсовского С.В. и Гринберга Г.А. Одним из первых практических применений метода стал дефектоскоп-электромагнит, предназначенный для контроля колесных пар вагонов и их осей разработанный под руководством Карпов Ф.М. Кроме того, в 1936г. он внедрил дефектоскопическое оборудование для контроля рельс, основанное на новом в то время пондеромоторном методе. Оборудование устанавливалось на подвижном составе. Дальнейшим развитием и усовершенствованием пондеромоторного метода неразрушающего контроля занимался Янус Р.И. В 30-е годы вопросами, возникающими при использовании магнитных методов неразрушающего контроля, занимались Михеев М.Н и Акулов Н.С. Первая опубликованная монография 1946 г. полностью посвященная вопросам дефектоскопии, структуроскопии и магнитным методом неразрушающего контроля была написана Янусом Р.И.. В нем рассмотрены вопросы поиска несплошностей ферромагнитных металлов и сплавов, а также структурных неоднородностей в них. В монографии «Магнитная дефектоскопия» Янус свел вместе наиболее полное описание теории магнитного метода неразрушающего контроля и внедрения на тот момент в различных отраслях промышленности магнитной структуроскопии и дефектоскопии. Обобщив известные факты и собственные наработки, он дал научное обоснование физики процессов магнитных измерений, используемых в промышленной дефектоскопии, а также привел основные принципы конструирования дефектоскопов различного назначения. Основным направлением развития теории стало решение задач формирования магнитного поля дефекта. Постановку и решение подобных задач в общем виде Янус Р.И. привел в своих работах. Магнитное поле дефекта автор предложил определять по намагниченности материала объекта контроля (ОК) проводя оценку сформированного поля рассеивания. При этом учитываются значения как объемных, так и поверхностных зарядов. Была предложена модель дефекта с аппроксимированным полем магнита

эквивалентного - магнитных зарядов, расположенных на границах раздела сред. При этом плотность заряда таких источников пропорциональна вектору нормальной составляющей напряженности магнитного поля всех этих источников. В дальнейшем, основываясь на его представлении, в работах были исследованы распределение напряженности магнитного поля поверхностных дефектов. Кроме прямоугольного типа поверхностного дефекта, рассмотрены косоугольный и зубчатый дефекты. Большое число трудов посвящено вопросам формирования магнитного поля дефектов. Установлено, что оно определяется не только параметрами самих дефектов, но и нелинейностью магнитных свойств материала объекта. Нелинейность может определяться в зависимости от решаемой задачи в связи с влиянием поверхности объекта контроля, образование в зоне дефекта магнитных полей либо по намагниченности. Получены результаты оценки составляющих напряженности вторичного поля дефекта и значимость перечисленных факторов на поле дефекта.

В 1952 г. П.А. Халилеев и В.В. Власов при решении задачи контроля рельс создали индукционные искатели с возможностью визуализации результата при помощи киноленты. Приборы широко применяли в вагонах-дефектоскопах. Сотрудники Всесоюзного научно-исследовательского института строительства магистральных трубопроводов (ВНИИСТ) Маховер К.С. и Усенко К.В. разработали магнитографический метод неразрушающего контроля. В следующие годы к развитию метода подключились научные коллективы МВТУ им Н.Э. Баумана, АН БССР, в Институте физики металла Уро РАН, Белорусском политехническом институте, Шосткинском филиале НИКФИ, СКБ «Газприборавтоматика», и предприятия «Ростовэнергоремонт» и Калининградский экспериментальный завод. Благодаря работам Фалькевича А.С. и Хусанова М.Х. метод получил широкое распространение. В дальнейшем работы по оптимизации и усовершенствованию метода занималась плеяда ученых, среди которых были Голант Ю.Ш., Жолнерович О.А., Кашуба К.А., Козлов В.С., Михайлов С.П., Новиков А.Е., Фещенко Ю.Б., Шарова А.М., Щербинин В.Е., Щур М.Л. Первые магнитографические дефектоскопы были созданы и внедрены

для контроля сварных соединений под руководством Фалькевича А.С. А уже в 1953г. предложенная им конструкция магнитографического дефектоскопа с вращающейся магнитной головкой применяется в приборах данного типа по сегодняшний день.

Работая в СФТИ Мирошин Н.В. обнаружил эффект нелинейности связи между намагничивающим полем и намагниченностью. Изучив его Мирошин показал, что если объект контроля внесенный в сильное постоянное магнитное поле, то становится возможным выявить дефекты, не выходящие на поверхность. В дальнейшем автор обосновал применимость мостовой схемы для задач измерения локальной намагниченности в ферромагнетиках. Большое внимание уделялось задачам выявления трещинноподобных дефектов. Так Иванчиков В.И. предложил использовать для поиска открытых сквозных трещин в пластинах конечной постоянной толщины из токопроводящих материалов использовать поперечное переменное магнитное поле. В 1954г. благодаря Янусу Р.И. появляется феррозондовый метод дефектоскопии, примененный для диагностики деталей машин. Чуть позже в 1959г. для задач неразрушающего контроля авиационной промышленности в ВИАМ Корсаковым В.В. был разработан феррозондовый полюсоискатель ФП-1. Большой вклад в изучение полей рассеивания дефектов внес Власов В.В. Основываясь на данных полученных при контроле новых и бывших в употреблении рельсах он установил, что на поля рассеивания поверхностного дефекта существенно влияют магнитные свойства материала вблизи поверхности изделия. Так магнитомягкий материал у поверхности объекта контроля способствует увеличению полей рассеивания у дефектов. Верно и обратное - наличие у поверхности мягкого в магнитном отношении слоя материала вызывает уменьшение поля дефекта. Власов В.В. также развил теорию Януса Р.И. в отношении внутренних дефектов магнитных металлов. Им установлено, что для магнитостатики поле дефекта несплошности создается не только поверхностными зарядами на стенках дефекта, но и объемными зарядами, вызванными магнитной нелинейностью материала объекта контроля в

ближайших к дефекту участках металла. При изучении полей рассеяния от наружных и внутренних дефектов В.В. Власов подтвердил и развил ряд положений теории магнитостатики Януса Р.И. Так же он определил, что для магнитных полей, величина которых намного превышает поле, соответствующее максимальной магнитной проницаемости материала объекта контроля, наличие объемных зарядов может уменьшить поле дефекта. Ершов Р.Е., взяв в основу идеи и наработки Януса Р.И, и Сапожникова А.Б., решил задачу определения искажения магнитного поля ферромагнитного материала при нелинейности магнитных свойств ферромагнитной среды в области средних и сильных магнитных полей вызванное наличием дефекта несплошности типа поперечной трещины.

Выявлением локальных дефектов в 70-х годах занимались Костин В.В. и Кашуба Л.А. Они установили, что параметры поля вызванное наличием дефекта соответствует параметрам самого протяженного дефекта. Бурное развитие микропроцессорной электроники на рубеже тысячелетий дало свой отголосок и в практике применения приборов магнитной дефектоскопии. Это позволило решать обратные задачи для разработки численных методов определения параметров дефектов. Задачи решались с использованием результатов измерения характеристик поля рассеяния. В том числе в работе Щура М.Л. и Щербинина В.Е. была рассмотрена важнейшая задача определения геометрических параметров поверхностных дефектов по их магнитному полю. Достаточно много работ того времени посвящены исследованиям способам определения размеров дефектов на основе решения задачи Неймана касательно магнитного поля рассеяния. В целом ряде задач внимание авторов обращено на анализ характеристик обобщенной исследуемой модели типа: открытая или закрытая полость в ферромагнитной среде, в режиме намагничивания однородным магнитным полем. При этом, в задачах, где ферромагнетик или некий исследуемый автором объект имеет поверхность раздела сред, направление вектора напряженности намагничивающего поля лежит в плоскости параллельной поверхности ОК. В 1960г. Зацепиным Н.Н. и Щербининым В.Е.



был разработан феррозондовый метод контроля сварных швов. В своих работах они приводят метод теоретического расчета поля дефекта в трехмерном пространстве. Также они подробно описали особенности составляющих магнитного поля обусловленного наличием различных поверхностных дефектов.

На основании этой обобщенной модели были проведены многочисленные экспериментальные исследования. В них рассматривались основные классы встречающихся на практике дефектов. Наибольшее внимание было уделено исследованию магнитных свойств искусственных поверхностных пазов с различным раскрытием и естественным дефектам. Другие работы рассматривают варианты исследований магнитного поля при наличии в ОК цилиндрических полостей.

Способы достижения однородности магнитного поля для режимов параллельного намагничивания ОК в основном при использовании приставных магнитов или электромагнитов подробно разобраны в работах. Также приведены описания применения и других типов намагничивания, таких как пропускание электрического тока по изделию или по стержню внутри изделия.

Вихретоковая дефектоскопия является широко распространенным направлением вихретокового метода неразрушающего контроля, который занимает одно из ведущих мест среди методов, используемых для контроля металлических изделий, в том числе и сортового металлопроката. Распространенность метода в первую очередь обусловлена свойственными ему многочисленными преимуществами. Среди прочего, следует отметить высокую производительность контроля, возможность автоматизации, как самого процесса, так и обработки его результатов, независимость результатов контроля от параметров окружающей среды (температура, давление, влажность и т.д.) Безопасность проводимого контроля и возможность его проведения без непосредственного контакта вихретокового преобразователя (ВТП) и контролируемой поверхности, относительная простота конструкции ВТП и их повторяемость. Дефектоскопия вихретоковым методом неразрушающего контроля основывается на анализе распределения электромагнитных полей в

объекта контроля зависящих от наличия локальных неоднородностей в них. Расчет таких полей в общем случае очень трудоемок. Он относится к числу сложных краевых задач электродинамики. Представляет собой задачу определения функций трехмерных векторов в условиях многосвязных областей и, в общем случае, границы раздела таких областей имеют разнообразную форму, что приносит дополнительные трудности в математическом описании процессов. Советская, а затем и российская история развития вихретокового метода неразрушающего контроля и вихретоковой дефектоскопии представлена плеядой ученых и инженеров. Первые фундаментальные теоретические работы посвященные непосредственно вихретоковому методу неразрушающего контроля принадлежат Сапожникову А.Б. и его ученикам. Основываясь на экспериментальных исследованиях, Сапожниковым А.Б. были обобщены и изложены теоретические аспекты задач электромагнитной дефектоскопии при использовании переменных магнитных полей. Свою лепту внес Иванчиков В.И. рассмотревший задачу распространения однородного переменного поля в металлическом параллелепипеде конечного размера, при распространении поля в направлении перпендикулярном торцевым сторонам. В своей работе Михановский В.И. приводит решение задачи расчета магнитного поля малого дефекта в объекте контроля типа ферромагнитный цилиндр с малым дефектом произвольной формы. Автор представляет дефект как локальную неоднородность удельной электрической проводимости и приводит расчет с использованием интегрально-дифференциальных уравнений метода возмущений. Полученные результаты не позволяют в полной мере оценить величину поля дефекта, однако в работе получены результаты, показывающие значительное искажение действительной составляющей вносимой в вихретоковом преобразователе (ВТП) ЭДС. Исследование сквозной трещины в пластине конечной толщины и бесконечной длины и ширины провел Кессених В.Н. Он рассчитал влияние трещины на однородное магнитное поле приложенное к объекту контроля используя метод решения интегрально-дифференциального уравнения. В дальнейшем работу Кессениха В.Н. продолжил и развил Шилов Н.М. Он

предложил перейти от решения интегрального уравнения к системе алгебраических уравнений, что позволило ему рассмотреть приближенно задачу расчета поперечного переменного поля в пластине. При решении автор использовал представление объекта контроля в виде конечной системы контуров. Плотность периферийных токов, влияние которых следует учитывать при рассмотрении общей картины поля дефекта в своем труде рассмотрели Комаров В.А. и Власов В.В. В работе получена физическая карта вихревых токов формирующего поле дефекта. Первой работой, в которой достаточно подробно и качественно представлена картина распределения вихревых токов при наличии дефекта в объекта контроля возбуждаемых ВТП накладного типа, стал труд Власова В.В. и Комаров В.А. Ими показана общность параметров распределения токов вдоль дефекта магнитных и немагнитных материалов, при прочих равных условиях. В своих следующих работах Власов В.В. совместно с Бурцевой В.А. предложили вариант формализации магнитного поля дефекта, обусловленного вихревыми токами, в котором для качественной оценки параметров поля применялись уравнения двухпроводной линии. Также Власовым В.В. в работе было показано, что при наличии в металле объекта контроля дефекта, в его поперечном сечении распределения тангенциальной составляющей и нормальной составляющей магнитостатического поля дефекта качественно совпадают между собой. Зацепин Н.Н. провел исследования распределения вихревых токов в зоне расположения дефекта и показал, что поля ими обусловленные определяется в окружающей среде электромагнитными свойствами не только материала исследуемой детали, но и параметрами дефекта. Работа Зацепина Н.Н. посвящена распространенной задаче поиска поверхностных продольных дефектов при контроле проводящих изделий цилиндрической формы. Рассмотрена топография магнитного поля вихревых токов над продольным дефектом, наведенного при помощи короткой проходной катушки. В качестве чувствительных элементов были использованы малогабаритные индуктивные и феррозондовые преобразователи. Автором показано, что при подобном способе возбуждения вихревых токов в образце наличие дефекта в контролируемой зоне приводит к

изменению магнитного поля, при этом поле распределяется следующим образом: часть поля обтекает дефект в материале объекта контроля, другая выходит на поверхность, при этом изменяется плотность вихревых токов. Численные методы стали доступными для решения задач вихретоковой дефектоскопии только после достаточного развития компьютерной и микропроцессорной техники. В работах Герасимова В.Г., Сухорукова В.В. и др. приводятся возможные варианты применения этого математического аппарата применительно к решениям задач основанных на взаимодействии дефектов и электромагнитных полей. Сухоруков В.В. в работе применил метод сеток для исследования применения проходных ВТП для задач поиска ряда характерных типов дефектов. Шкатов П.Н. представил в свою теорию возмущения границ раздела сред направленную для решения задач в области однородных электромагнитных полей. В ней решение задачи сводится к численному анализу интегрального уравнения применительно к дефектам типа бесконечной узкой трещины в виде прямоугольной прорези. Применение численных методов обычно ограничивалось решением двумерных задач. В работах Дорофеева А.Л. и др. использовались методы интегральных уравнений (МИУ) и метода конечных элементов (МКЭ). В работах ученых Ключева В.В. и Беды П.И. приведены данные полученные при проведении экспериментальных исследования топографии магнитного поля дефекта вызванного приложенным переменным полем. Авторы исследовали применение вихретоковой дефектоскопии для различных задач и типов объекта контроля. Для их решения разрабатывались упрощающие модели. Так Тетерко А.Я. в своей работе представил модель объекта контроля в виде полупространства. В рассмотренной модели дефект представлен в виде цилиндрической прорези бесконечной длины. В модели учитывалось продольное распространение однородного электромагнитного поля. Модель Власова В.В. рассматривала поле дефекта в виде прямоугольной прорези, расположенной в полупространстве описывающее ОК из проводящего ферромагнитного материала. Поле наводилось круглым витком с током, расположенным в параллельной плоскости над поверхностью полупространства. Своими работами Шатерников В.Е. внес существенный вклад

в развитие теоретических основ вихретоковой дефектоскопии. Им были предложенные обобщающие расчетно-теоретические модели. В них рассматривались вопросы решения задач вихретокового и магнитного контроля изделий сложной формы. Интересными решениями стали разработанные им алгоритмы расчета параметров ВТП методами квазиконформных отображений. К особенностям методов можно отнести использование преобразователей с произвольным сечением обмоток применяющихся для целей дефектоскопии. Трехмерная математическая модель, предложенная Мужичким В.Ф., основана на замещении поверхностными токами, протекающими по граням прямоугольного узкого дефекта, поверхностных зарядов. Федосенко Ю.К. в своих работах приводит решение задач вихретоковой дефектоскопии используя строгий расчет электромагнитного поля ВТП накладного типа. В приведенной модели рассматривается в качестве объекта контроля металлический лист в котором обнаруживаются как поверхностные, так и внутренние дефекты произвольной формы. Накладное ВТП рассматривается им по методике Власов В.В как двухпроводная линия. Решение поставленной задачи сводится к системе интегральных уравнений с применением функций Грина. Развитие цифровой техники и ЭВМ позволило решать такую систему уравнений с использованием численных методов расчета. Большой вклад в развитие теории и практики вихретокового метода дефектоскопии внес Сухоруков В.В. Используя аналитические и численные методы он выполнил решения целого ряда линейных и нелинейных краевых задач теории электромагнитной дефектоскопии. Им проведенные расчеты касательно задач определения параметров статических сигналов от наличия дефектов в трубах. Также он исследовал возможности вихретокового метода контроля для определения параметров коротких труб. Сухоруковым В.В. были впервые разработаны специализированные «модели-аналоги» примененные для решения краевых задач вихретоковой и магнитной дефектоскопии. Влиянию параметров дефекта топографии магнитного поля посвящена работа Пашагина А.И. Экспериментальные исследования автора

направлены на определение значимости влияния частоты намагничивающего поля при контроле дефектов в ферромагнитных материалах.

Вихретоковый метод дефектоскопии характеризуется большим количеством разнообразных типов и размеров вихретоковых преобразователей. На всем протяжении развития метода теоретическим исследованиям ВТП занимались практически все исследователи и ученые так или иначе связанные с вихретоковым методом НК. Среди них значительный интерес вызывают работы Сапожникова А.Б., Зацепина Н.Н., Герасимова В.Г., Ключева В.В. Среди зарубежных авторов исследованием ВТП занимались Ферстера Ф., Дидс В.Е. и Додд Ц.В. Кроме того значительный интерес представляют работы Дорофеева А.Л., Лещенко И.Г., Родигина Н.М., Шатерникова В.Е., Шкарлета Ю.М. и др. Рассмотренные авторами математические модели имеет неоспоримую практическую ценность для разработчиков вихретоковых дефектоскопов. Многообразие самих моделей и вариантов их расчетов обусловлено значительной сложностью и вариативностью ВТП и влияния на них дефектов разнообразной формы. В большинстве вышеприведенных работ, рассматривающих разнообразные модели дефектов, краевые задачи решаются методом разделения переменных. Среди наиболее распространенных моделей можно перечислить модели с накладным витком с током над плоским многослойным проводящим ОК; ОК в виде многослойного проводящего цилиндра в поле проходного витка с током; виток с током над или внутри электропроводящей многослойной сферы и т.п. Широкое распространение в практике вихретоковой дефектоскопии имеют накладные преобразователи. Соболев В.С. в своей работе рассматривает накладные ВТП цилиндрической формы. В ней он приводит точные расчеты витка с током, проведенные при помощи расчетов на ЭВМ. Расчет вносимого комплексного сопротивления в круглый виток с током лег в основу его работы посвященной анализу модели описывающей проводящую сферу в приложенном поле витка с током. Значительным вкладом в исследование электромагнитного поля стала модель Шкарлета Ю.М., описывающая плоский двухслойный проводящий объект в приложенном поле ВТП представленном в виде витка с

током. Автором были предложены эффективные методы приближенного расчета накладных ВТП и ВТП экранного типа, позволившие также выделить закономерности распределения электромагнитного поля ВТП для исследуемой модели. Шкарлет Ю.М, обогатил метод и решением прикладных задач, в том числе и методами обработки сигналов ВТП. Всестороннее исследование процесса вихретокового контроля изделий сложной формы провел Шатерников В.Е. и его последователи. Одной из сложных задач, решением которой он занимался, стала модель описывающая проводящий сфероид в поле вращения. В дальнейшем модель была расширена до описания набора сфероидов в поле накладного витка с током. Расчеты вносимого ЭДС, построенные по полученным результатам годографы и исследование влияния параметров ОК на выходной сигнал преобразователя представлены Шатерниковым В.Е. в ряде работ. Основываясь на результатах проведенных исследований им были разработаны оптимальные конструкции ВТП по критериям локальности зоны контроля. Автором были предложены и реализованы конструкции ВТП предназначенных для работы в различных условиях, в том числе и при высоких температурах. Он занимался многоцелевыми приборами вихретокового контроля и измерителями геометрических параметров изделий сложной формы. Созданию многочастотных вихретоковых и магнитных дефектоскопов была посвящена работа Тетерко А.Я. В ней он рассматривает аспекты создания ВТП и приводит решения задач отстройки от ряда влияющих факторов. Цели работы направлены на повышение точности контроля изделий из проводящих немагнитных материалов, и определению параметров как поверхностных и подповерхностных дефектов, так и внутренних. Определенный интерес представляют адаптивные средства неразрушающего контроля. В частности Ивченко А.В. занимался практикой дефектоскопии с применением адаптивных вихретоковых дефектоскопов. Адаптивность разработанного им одночастотного вихретокового дефектоскопа заключалась в автоматически устанавливающейся рабочей частоте ВТП. При этом показания прибора от выявляемых коррозионных поражений немагнитной металлической обшивки летательных средств оставалась неизменной при

вариации толщины контролируемого материала и толщины непроводящего защитного покрытия на внешней стороне контролируемого объекта. При решении проблемы определения оптимальной рабочей частоты ВТП и повышении точности измерения размеров коррозионных поражений, автором рассматривались лишь три влияющих фактора, как то: толщина ОК; величина зазора между ВТП и поверхностью ОК, включающего технологический, воздушный зазоры и толщину непроводящего покрытия; и глубину залегания дефектов. Одними из самых распространенных дефектов в практике вихретоковой дефектоскопии являются разнообразные нарушения сплошности контролируемого материала. Большое количество вопросов и задач возникающие перед исследователями в этой области вихретокового контроля привело к созданию целостной теории, описывающей закономерности распределения электромагнитного поля в изделиях различной геометрии. Свои работы посветили такие ученые, как немецкий основоположник теории вихретокового контроля Фредерик Ферстер, так и наши соотечественники: Беда П.И., Зацепин Н.Н., Дорофеев А.Л., Федосенко Ю.К., Мужичкий В.Ф., Сухоруков В.В. В своих трудах они рассматривают вопросы, связанные с обнаружением дефектов металла типа нарушение сплошности. Выведены закономерности распределения переменного электромагнитного поля при наличии трещиноподобных дефектов и несплошностей различных форм. Теоретически и экспериментально получены годографы вносимых напряжений характеризующих различные режимы проведения контроля. Проведены исследования влияющих факторов, в том числе и из конструкторских особенностей ВТП. Разработаны различные методики по увеличению отношения сигнал-шум и выделению информативных сигналов. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований была построена комплексная теория распределения электромагнитных полей сосредоточенных источников. В ней описаны методы контроля многослойных изделий разнообразной формы, как: изделия плоской, цилиндрической, сферической, эллиптической и прочие. Были разработаны точные и приближенные методы расчетов различных моделей ВТП, в том числе для



контроля многослойного плоского проводящего объекта накладным преобразователем в виде витка с током; модель проходного ВТП в виде витка стокм для контроля протяженных многослойных проводящих цилиндров; сферические проводящие ОК в поле витка с током и т.д. В практику вихретокового контроля и дефектоскопии были внедрены способы обработки информативных сигналов. Наиболее широкое распространение в промышленности на сегодняшний день получили: амплитудно-фазовый и фазовый способы. Для решения определенных, достаточно узких задач, отечественными и зарубежными учеными были предложены значительное количество и других методов обработки сигналов ВТП. Среди них можно привести переменного-частотный, мультичастотный, модуляционный, автогенераторный и т.д., позволяющие используя отстройку от мешающих факторов выделять информативную составляющую сигналов первичных вихретоковых преобразователей.

## **6. Применение вихретокового контроля**

Вихретоковый метод стал одним из наиболее широко применяемых методов контроля металлических материалов, изделий и конструкций. На сегодняшний день он позволяет выполнять техническую диагностику всех наиболее важных и распространенных металлических изделий:

- электропроводящих прутков;
- проволоки;
- труб;
- листов;
- пластин;
- покрытий, не исключая и многослойные;
- железнодорожных рельсов;
- корпусов атомных реакторов;
- шариков и роликов подшипников;
- крепежных деталей и иных промышленных изделий.

Особенностью вихретокового контроля является тот факт, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта. Их взаимодействие происходит обычно на расстояниях, достаточных свободного движения преобразователя относительно объекта долей миллиметра до нескольких миллиметров. Поэтому есть возможность получать хорошие результаты контроля даже при высоких скоростях движения объектов, а значит он идеально подходит для внедрения в автоматизированное поточное производство, получение первичной информации в виде электрических сигналов, бесконтактность и высокая производительность определяют широкие возможности автоматизации вихретокового контроля.

### **Список литературы**

1) Аркадьев В.К. О развитии теоретических основ дефектоскопии. // Известия АН. 1937. № 2. С. 233 - 239.

2) История развития методов неразрушающего контроля. Неразрушающий контроль. Россия. 1900 - 2000 гг.: справочник/ В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, С. В. Румянцев, др. – М. : Машиностроение, 2002 . – С. 632.

3) Клюев В.В. Исследование электромагнитных методов и разработка комплекса приборов для неразрушающего контроля дефектов, толщины и смещений изделий в процессе производства и технологических испытаний/ Автореферат докт. дисс – М., 1972.

4) Мужичкий В.Ф. Развитие теории и создание электромагнитных средств дефектоскопии изделий сложной формы / Автореферат докт. дисс. - М., 1986

5) Сапожников А.Б. Основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел/ Автореферат докт. дисс. Томск, ТГУ, 1951.

6) Шатерников В.Е. Электромагнитные методы и средства контроля изделий сложной формы/ Автореферат докт. дисс. – М., 1976

7) Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 5, Electromagnetic Testing/ technical editor Satish S. Udpa; Editor Patrick O. Moore – ASNT, 2004. – p. 536.