

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ФОН ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА, СНИМАЕМОГО С ИНДУКЦИОННОЙ МАГНИТНОЙ ГОЛОВКИ

© 2021 г. В.В. Павлюченко¹, Е.С. Дорошевич^{1,*}

¹Белорусский Национальный Технический Университет,
Беларусь 220013 Минск, пр-т Независимости, 65
E-mail: ess.doroshevich@gmail.com

Поступила в редакцию 17.05.2021; после доработки 22.06.2021

Принята к публикации 25.06.2021

Представлены экспериментальные зависимости $U(t)$ электрического напряжения, снимаемого с индукционной магнитной головки (МГ), движущейся относительно магнитного носителя (МН). Выявлены и исследованы фоны краев МН, локальных дефектов МН, фон неоднородного магнитного поля локального источника, фоны дефектов и структурных неоднородностей объекта, эфирный электромагнитный фон, фон качества поверхности объекта и поверхностных микроскопических неоднородностей материала. Выявлены и исследованы резонансные фоны самовозбуждения измерительной системы на сигналах краев МН, дефектов МН, приборных и сетевых наводок и помех, дефектов объекта, эфирных электромагнитных полей. Резонансные пики являются следствием самовозбуждения измерительной системы, включающей МГ, и возникают на задних фронтах любых сигналов достаточной величины, длительность заднего фронта которых составляет порядка четверти периода собственных колебаний измерительной системы. Определены амплитудный и частотный спектры фона сигналов дефектов объекта, МН и помех и описывающие их аналитические выражения. Показаны результаты выделения полезного сигнала из полного сигнала, записанного на МН. Исследования дифференциального фона электрического сигнала позволяют совместно с разработанными авторами ранее методами гистерезисной интерференции вести контроль свойств объектов в автоматическом режиме с программным управлением, что значительно повышает чувствительность и точность контроля. Для достижения этой цели рекомендовано устанавливать параметры системы измерения на пороге возникновения в ней собственных свободных колебаний.

Ключевые слова: магнитный носитель, магнитная головка, дефект, дифференциальный фон электрического сигнала.

DOI: 10.31857/S0130308221080054

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения точности контроля свойств объектов разными методами неразрушающего контроля необходимо уменьшать влияние различных отрицательных факторов, сопутствующих процессу контроля. Эти факторы создают фон сигнала, снимаемого с датчика, который следует исключать из полного сигнала для выделения полезной информации. В случае магнитографического контроля [1, 2] такой фон создают сигналы краев магнитного носителя, сигналы электромагнитных помех и другие сигналы. Различные помехи могут присутствовать и в сигналах датчиков вихретоковой дефектоскопии при их предварительной обработке [3], а также при определении внешних параметров электропроводящего объекта по измерениям возмущений переменного магнитного поля [4].

Выделение полезной информации об объектах при использовании магнитного гистерезиса в импульсных магнитных полях и обнаружении дефектов сплошности в образцах из алюминия магнитоимпульсным методом проведено нами в [5, 6] и при нахождении распределений импульсных магнитных полей вблизи объектов из электропроводящих материалов [7].

Для разработки способов выделения сигнала дефекта из полного сигнала могут быть использованы результаты теоретических и экспериментальных работ по выявлению дефектов: анализ топографии магнитных полей рассеяния в ферромагнитных изделиях [8], моделирование определения геометрических параметров внутренних дефектов методом магнитной дефектоскопии [9], исследование магнитного поля рассеяния от дефектов трубопровода [10], изучение поля рассеяния пластины с поверхностным дефектом в однородном поле [11]. Для этого может быть полезным компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов в ферромагнитной пластине методом пространственных интегральных уравнений [12], результаты магнитографической дефектоскопии изделий с использованием постоянных магнитов [13] и способ оценки параметров дефектов в сталях [14].

При выделении сигналов, считываемых с магнитного носителя, следует учитывать исследования наложения друг на друга электрических сигналов преобразователей магнитного поля при гистерезисной интерференции перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля [15] и формировании изобразжений электрических сигналов для контроля металлов в импульсных маг-

нитных полях с использованием гистерезисной интерференции [16]. Надо также отметить большое количество не достаточно изученных причин возникновения фона сигнала при магнитографической дефектоскопии, затрудняющих процесс контроля и понижающих его качество. Поэтому целью настоящей работы является наиболее полное изучение фона электрического сигнала, снимаемого с индукционной магнитной головки при сканировании ею магнитного носителя для повышения точности контроля удельной электропроводности, магнитной проницаемости и геометрических параметров объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях, а также контроля дефектов сплошности в этих объектах.

Актуальность проведения данных исследований состоит, в частности, в том, что при осуществлении контроля объектов, в том числе объектов ответственного назначения, в настоящее время требуется повышение точности контроля, его производительности и разрешающей способности, возможности контроля труднодоступных частей объекта, а также использования одновременно нескольких методов контроля. Магнитографический метод позволяет получать мгновенное распределение информационных магнитных полей на площадях в десятки квадратных сантиметров и существенно больших (порядка 1 м^2) с разрешением по площади $0,01 \text{ мм}^2$. При считывании информации магнитного носителя с помощью магнитооптической пленки с визуализацией полей контроль осуществляется в режиме, близком к режиму реального времени с задержкой на несколько десятков микросекунд. Более того, разрабатываемые методы контроля с помощью МН могут быть применены при использовании вихретоковых преобразователей, магнитооптической пленки, флюкс-детекторов, преобразователей Холла и во многих других случаях.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При сканировании магнитного носителя (МН) индукционной магнитной головкой (МГ) электрический сигнал, снимаемый с нее, пропорционален производной от напряженности магнитного поля по времени при осуществлении временной развертки сигнала или производной по пространственной координате, вдоль которой происходит движение МГ. Поэтому естественно назвать такой фон дифференциальным. Наличие этого фона обусловлено многими причинами, исследование которых проведено в данной работе.

При нахождении дефектов сплошности в диамагнитных и парамагнитных металлических объектах, а также при получении гистерезисной интерференции (HI) для контроля толщины и удельной электропроводности материала объектов авторами найдены значительные отклонения зависимости электрического напряжения от времени развертки $U(t)$ от нулевого уровня сигнала в отсутствие сигналов полей дефектов исследуемых объектов.

Известно [1, 2, 6], что при движении магнитной головки над краем намагниченного магнитного носителя в ней индуцируется однополярный сигнал и его амплитуда зависит от величины остаточной намагниченности МН. Возникает задача нахождения зависимости величины этого сигнала от расстояния МГ до края МН по линии сканирования и высоте над МН.

Найдем зависимость величины сигнала от длины участка МН, пробегаемого магнитной головкой на минимальном расстоянии МГ от поверхности МН, то есть на расстоянии толщины диэлектрической подложки МН. Характеристики используемого магнитного носителя такие же, как и в [15, 16].

Зависимость $U(t)$, снимаемого с индукционной магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с записями магнитных полей, для участков МН разной длины изображена на рис. 1. Здесь показаны также пики сигналов, обусловленные началом и концом участков МН, резонансные пики и локальные максимумы и минимумы сигнала зависимости $U(t)$. Расстояние от МГ до рабочего слоя датчика МН составляет $0,16 \text{ мм}$. На рис. 1 и на всех последующих рисунках отрезку времени 1 мс соответствует отрезок расстояния, равный $1,1 \text{ см}$.

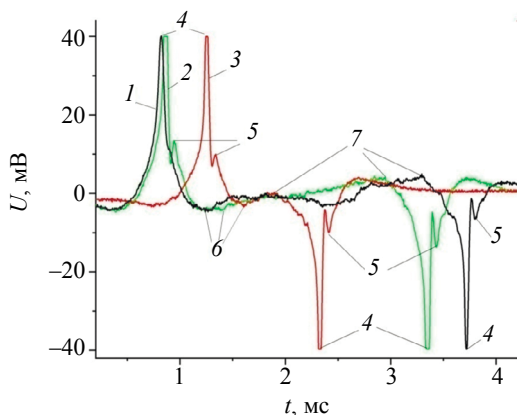


Рис. 1. Зависимости $U(t)$, снимаемого с МГ, сканирующей участок МН длиной:

1 — 32 мм; 2 — 27 мм; 3 — 12 мм; 4 — пики сигналов от краев МН; 5 — вторые резонансные пики; 6 — минимумы и 7 — максимумы сигнала.

Из графиков на рис. 1 следует, что магнитная головка начинает воспринимать намагниченный носитель уже на расстоянии, равном примерно 3 мм от ближнего края МН. Сначала величина сигнала падает до $-4,38$ мВ при 0,33 мс. МГ перестает воспринимать МН на расстоянии около 2 мм от его дальнего края. В промежутке между пиками 4, соответствующими краям участков МН разной длины, зависимость $U(t)$ не является горизонтальным линейным отрезком, а имеет минимумы 6 и максимумы 7, что затрудняет процесс контроля объекта. С увеличением амплитуды воздействующего магнитного поля величина этих максимумов растет (значит, растут и искажения измеряемого сигнала) и достигает величины пиковых значений сигнала 4 от краев МН. Временные (пространственные) зависимости сигнала края МН могут быть описаны экспоненциальными, обратными квадратичными функциями и функциями близкого к ним вида.

Для получения реального фона $U(t)$ выбран магнитный носитель с многочисленными локальными дефектами, такими, как локальные изломы, потертости, мятые участки МН, повреждения рабочего слоя и так далее. Влияние всех этих дефектов МН должно быть устранено или скомпенсировано. Скомпенсирован должен быть также фон неоднородного магнитного поля локального источника, используемого при измерениях.

Авторами обнаружено самовозбуждение используемой измерительной системы. Его влияние на результаты контроля пояснено графиками на рис. 2, где показана зависимость $U(t)$, снимаемого с МГ, сканирующей участок МН длиной 32 и 12 мм с пиками сигналов от краев МН и резонансными пиками сигнала. Резонансные пики являются следствием самовозбуждения измерительной системы, включающей МГ. Эти пики возникают при приближении частоты локальных изменений $U(t)$ к частоте собственных колебаний этой измерительной системы.

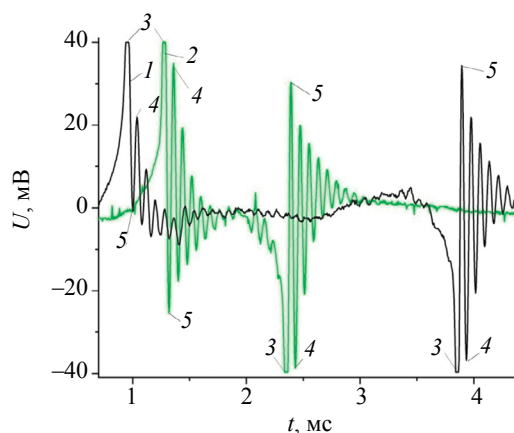


Рис. 2. Зависимости $U(t)$, снимаемого с МГ, сканирующей участок МН длиной: 1 — 32 мм, 2 — 12 мм; 3 — пики сигналов от краев МН; 4 — вторые резонансные пики; 5 — первые резонансные пики.

В результате корректировки величины активного и реактивного сопротивлений в контуре, содержащем МГ, получили зависимости 1 и 2 на рис. 2, соответствующие зависимостям 1 и 3 на рис. 1. На нисходящих ветвях пиковых участков этих зависимостей $U(t)$ появились дополнительные пики сигнала, то есть в контуре измерительной системы возникли свободные затухающие гармонические колебания. Из сопоставления указанных зависимостей $U(t)$ на рис. 1 и рис. 2 видно, что практически незаметному резонансному пику 5 кривой 1 на рис. 1 соответствует пик 4 кривой 1 на рис. 2, а резонансному пику 5 кривой 3 на рис. 1 соответствует резонансный пик 4 (см. рис. 2) значительно большей величины. В случае самовозбуждения возникли также первые резонансные пики 5 (см. рис. 2), являющиеся продолжением нисходящих ветвей сигнала. Нами установлено, что резонансные пики могут возникать на задних фронтах любых одиночных сигналов достаточной величины, длительность заднего фронта которых составляет порядка четверти периода собственных колебаний контура.

Примером этого могут служить пики (2,05 мс; $-5,94$ мВ; 2,08 мс; 3,75 мВ; 2,13 мс; $-8,75$ мВ; 2,16 мс; $-2,81$ мВ; 2,22 мс; $-10,94$ мВ; 2,24 мс; $-8,13$ мВ) зависимости 2 на рис. 2. Локальные отклонения, соответствующие указанным пикам, видны уже на рис. 1, зависимость 3.

Таким образом, для того чтобы не возникали дополнительные погрешности измерений следует найти такое соотношение индуктивных и активных сопротивлений в контуре измерительной системы, при которых не происходит ее самовозбуждения. При этом следует отметить, что чувствительность данной измерительной системы является максимальной именно вблизи ее резонансной частоты и с удалением от нее чувствительность падает.

С целью повышения точности измерений разработали способы уменьшения дифференциального фона путем использования эталонного дифференциального фона. Для этого изготовили датчик из магнитного носителя с дефектом в нем в виде полосы с полностью удаленным рабочим слоем. Намагнитили этот участок полем известного источника, считали с него информацию с помощью МГ и получили зависимость $U(t)$ дифференциального фона, изображенную на рис. 3. На этом рисунке показаны также минимумы сигнала 2, 7, 8, пики сигнала от краев датчика 3 и 4 и пики сигнала поля дефекта 5 и 6. Расстояние от МГ до рабочего слоя датчика МН составляет 0,16 мм, а над передним краем датчика оно равно 0,3 мм. Ширину дефекта МН нашли по временным координатам пиков 5 (4,06 мс) и 6 (4,13 мс) с преобразованием в зависимость величины сигнала от пространственной координаты x и получили величину, равную 0,77 мм.

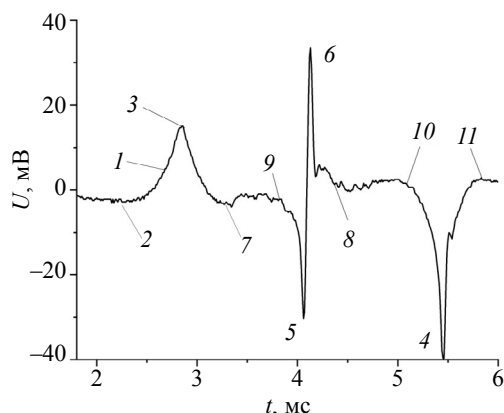


Рис. 3. Зависимость $U(t)$ дифференциального фона; 2, 7, 8, 9, 10, 11 — минимумы и максимумы сигнала; 3 и 4 — пики сигнала от краев МН; 5 и 6 — пики сигнала дефекта МН.

Изготовили второй датчик из такого же магнитного носителя, создали в нем дефект в виде полосы с частично удаленным рабочим слоем. Намагнитили этот датчик в таком же поле, как и первый, но с противоположным направлением напряженности. Совместили оба датчика друг с другом вплотную рабочими слоями, намагничеными противоположно, считали записанную на них информацию с помощью МГ и получили разностную зависимость $U(t)$ дифференциального фона, изображенную на рис. 4. Здесь также показаны пик от ближнего края датчиков 2, пики сигналов двух дефектов МН; 3, 4, 5, 6 — пики сигналов двух дефектов МН; 7 и 8 — максимумы и минимумы сигнала; 9 — координата краев датчиков.

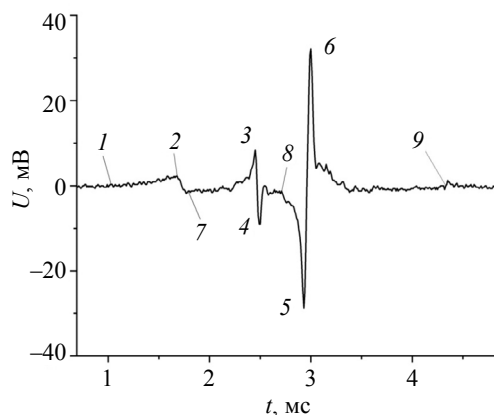


Рис. 4. Разностная зависимость $U(t)$ дифференциального фона; 2 — пик от ближнего края датчиков; 3, 4, 5, 6 — пики сигналов двух дефектов МН; 7 и 8 — максимумы и минимумы сигнала; 9 — координата краев датчиков.

сигнала поля дефекта с частично удаленным рабочим слоем 3 и 4, пики сигнала поля дефекта с полностью удаленным рабочим слоем 5 и 6, максимумы и минимумы разностного сигнала 7 и 8. Здесь же показана точка 9, соответствующая координате дальних краев совмещенных датчиков.

По координатам пиков сигналов дефектов 3 (2,45 мс) и 4 (2,49 мс) нашли, что ширина полосы с частично удаленным рабочим слоем равна 0,44 мм.

Из рис. 4 следует, что фон сигнала на рис. 3 почти полностью скомпенсирован фоном второго датчика. Так, вместо пика сигнала дефекта 4 (5,45 мс; -39,68 мВ) на рис. 3 получена соответствующая ему точка 9 (4,31 мс; 0 мВ) на рис. 4, где случайным образом скомпенсированы также локальные сигналы помех, составляющие около 0,9 мВ. Вместе с тем пик 3 (2,83 мс; 0,015 мВ) от ближнего края датчика на рис. 3 скомпенсирован не полностью. Ему соответствует пик 2 (1,67 мс; 2,19 мВ) на рис. 4. При этом образовался минимум сигнала 7 (1,77 мс; -1,88 мВ). По временным координатам пика 2 и минимума 7 установлено, что длина первого датчика больше, чем длина второго на 1,1 мм.

Таким образом, при совмещении двух датчиков МН удалось скомпенсировать сигналы фона, обусловленные краями датчиков МН и ростом сигнала при движении МГ в однородном магнитном поле МН. Однако остаются некомпенсированными локальные сигналы помех и наводок. Кроме того, на участок датчика с дефектом в виде полностью удаленного рабочего слоя невозможно записать какую-либо информацию, а поврежденный (с частично удаленным рабочим слоем) участок существенно искажает информацию при ее записи и считывании.

Обратим внимание также на тот факт, что при возникновении пиков сигналов от дефектов МН (и дефектов объектов) происходит резкий спад величины электрического напряжения МГ после прохождения ею записей полей этих дефектов на МН. Этот спад в силу инерционных свойств МГ не может происходить мгновенно. Это означает, что дополнительно возникают зоны контроля с пониженной чувствительностью и искажения измеряемых полей.

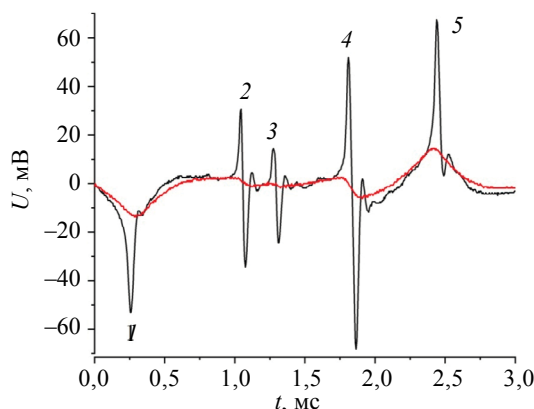


Рис. 5. Зависимости пиков $U(t)$ на разных расстояниях МГ от МН:
1, 5 — от краев МН; 2, 3 и 4 — для дефектов МН шириной 0,38, 0,33 и 0,61 мм.

Найдены зависимости пиков $U(t)$ дефектов МН в виде полос разной ширины с частично поврежденным рабочим слоем на разных расстояниях МГ от МН, изображенные на рис. 5. Здесь показана зависимость $U(t)$, полученная на расстоянии 0,03 мм МГ от МН (с большими амплитудами пиков) и зависимость на расстоянии 1,03 мм (с меньшими амплитудами). По координатам пиков сигналов дефектов 2 (1,04 мс и 1,075 мс), 3 (1,28 мс и 1,31 мс) и 4 (1,81 мс и 1,865 мс) нашли, что ширина дефектов соответственно равна 0,38 мм, 0,33 мм и 0,61 мм.

Указанные зависимости в виде отдельных участков, содержащих максимумы и минимумы сигналов, изображены на рис. 6. В порядке уменьшения амплитуды сигналов пиков эти зависимости соответствуют расстояниям МГ от МН 0,03 мм, 0,013 мм, 0,23 мм, 1,03 мм и 1,53 мм. Здесь показаны также резонансные пики. Исходя из анализа графиков на рис. 6 зависимость амплитуды сигнала дефектов от расстояния магнитной головки до магнитного носителя может быть представлена обратной или экспоненциальной зависимостью.

Полученные в данной работе временные и соответствующие им пространственные зависимости величины сигнала от края МН, края дефекта и вызванные другими причинами могут быть

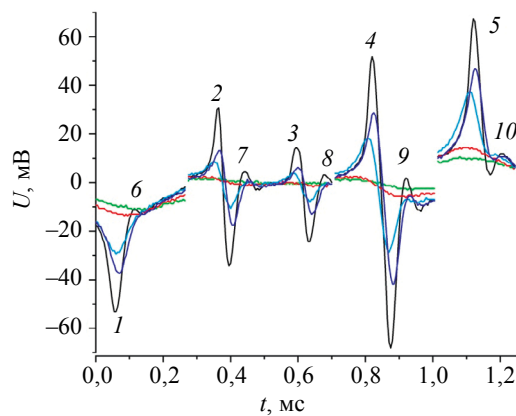


Рис. 6. Зависимости пиков $U(t)$ на разных расстояниях МГ от МН:
1, 5 — от краев МН; 2, 3 и 4 — для дефектов МН шириной соответственно 0,38, 0,33 и 0,61 мм; 6, 7, 8, 9, 10 — резонансные пики.

представлены в цифровом табличном виде или описаны экспоненциальными, обратными квадратичными функциями и функциями близкого к ним вида.

Покажем, что достаточно точный контроль объектов можно производить с помощью источника, формирующего неоднородное импульсное магнитное поле в плоскости измерения. Фон сигнала, обусловленный неоднородностью магнитного поля локального источника, накладывается на фоны остальных сигналов и увеличивает погрешности измерений.

На рис. 7 показан дифференциальный фон 1 плоского индуктора с максимумами сигнала 2 и 3 от краев МН. Здесь же показан интегральный фон 4 этого индуктора, полученный с помощью индикатора в виде дискретного датчика магнитного поля (ДДМП) [5]. ДДМП состоит из полос МН, укрепленных параллельно на тонкой гибкой диэлектрической основе на расстоянии порядка их ширины друг от друга. Шаг используемого ДДМП составляет 1,18 мм и соответствует расстоянию между соседними пиками одной полярности на рис. 7.

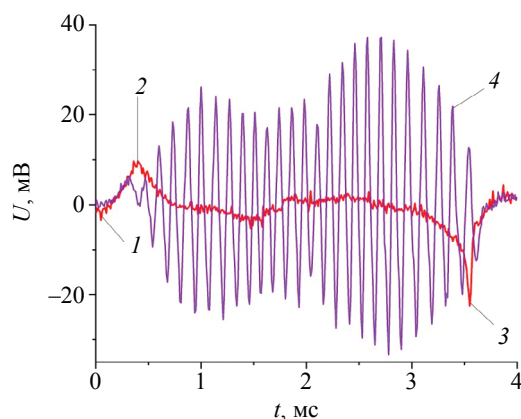


Рис. 7. Фон плоского индуктора:
1 — дифференциальный; 4 — интегральный; 2 и 3 — максимумы сигнала от краев МН.

Размеры плоского индуктора составляют $4,5 \times 4,0$ см, плотность намотки индуктора — 16 витков·см⁻¹. Измерения проведены на расстоянии 3,3 мм от плоскости магнитного носителя. Неоднородность фона локального источника обусловлена конечностью его размеров, разной плотностью намотки, влиянием остальных сторон контура индуктора и другими факторами. С помощью ДДМП определяли абсолютную величину напряженности магнитного поля. Максимальной величине электрического напряжения 75 мВ ДДМП соответствует напряженность магнитного поля порядка 180 А/см, а величине электрического напряжения 40 мВ — напряженность магнитного поля около 150 А/см. Таким образом, из рис. 7 следует, что максимальная неоднородность поля источника равна примерно 17 %.

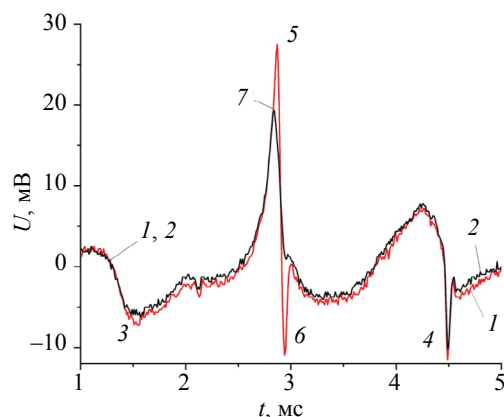


Рис. 8. Зависимости $U(t)$:
 1 — с сигналом дефекта; 2 — без сигнала дефекта; 3 и 4 — сигналы от краев МН; 5 и 6 — пики сигналов дефекта; 7 — пик сигнала края дополнительной пластины из алюминия.

Разработанные нами методы гистерезисной интерференции [5—7, 15, 16] позволяют значительно уменьшить влияние неоднородности поля источника и других отрицательных факторов на результаты контроля. Покажем, что с помощью указанного источника неоднородного поля с применением гистерезисных методов можно достаточно точно определять параметры дефектов металлических объектов. Зависимости электрического напряжения от времени $U(t)$, снимаемого с индукционной магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с записями магнитных полей, полученные для участков образца из алюминия с дефектом и без дефекта показаны на рис. 8. Образец представлял собой алюминиевую пластину толщиной 0,06 мм с дефектом в виде отверстия диаметром 0,8 мм. На пластину наложена алюминиевая фольга толщиной 0,015 мм. Под указанной пластиной была установлена дополнительная пластина из алюминия толщиной 0,06 мм, не перекрывающая дефект. Край этой пластины был расположен на расстоянии около 0,8 мм от оси дефекта. Такие параметры образца выбраны для того, чтобы определить возможности данного метода при контроле перекрывающих друг друга сигналов полей дефектов и неоднородностей объекта. При этом выбран один из наиболее трудных вариантов, при котором сигнал поля дефекта и сигнал края дополнительной пластины сравнимы по величине.

На рис. 8 изображена зависимость $U(t)$ 1 с сигналом дефекта и сигналом края дополнительной пластины. Здесь же показана зависимость 2 с сигналом края дополнительной пластины и не содержащая сигнал дефекта. Зависимость 2 является эталонной зависимостью. На рис. 8 также показаны сигналы краев МН 3 и 4, пики сигналов дефекта 5 и 6 и пик сигнала края дополнительной пластины из алюминия 7.

На рис. 9 показана зависимость 1, являющаяся разностью зависимостей $U(t)$ 1 и 2, представленных на рис. 8. Здесь же изображен фон 2, создаваемый сетевыми, приборными, эфирными и другими помехами, а также пики выделенного дефекта 3 и 4 и участки $U(t)$ с усредненными

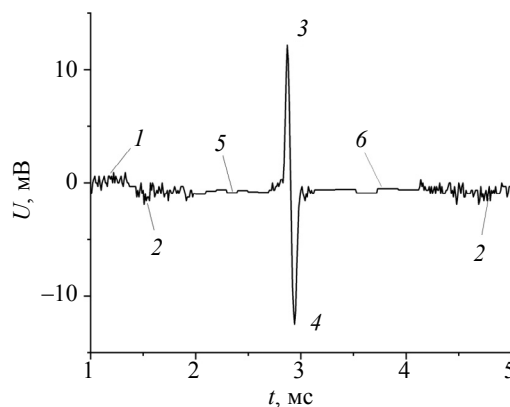


Рис. 9. Разностная зависимость $U(t)$:
 1, 2 — фон помех; 3 и 4 — пики дефекта; 5 и 6 — участки $U(t)$ с усредненными значениями сигнала.

значениями сигнала 5 и 6 соответственно по 10 и 20 точкам зависимостей. Этот фон зависит также от класса обработки поверхности объекта, параметров царапин, шероховатостей и других поверхностных микроскопических неоднородностей материала объекта.

Перечисленные факторы создают частотный спектр фона помех и наводок. В данном случае диапазон этого спектра начинается со времени дискретизации измерений цифрового осциллографа 10 мкс и заканчивается согласно параметрам зависимости 1 на рис. 9 величиной порядка 200 мкс.

Выделить более точно временные координаты дефекта и края дополнительной пластины, а также наложение сигналов дефекта и края дополнительной пластины можно с использованием графиков на рис. 10 и рис. 11.

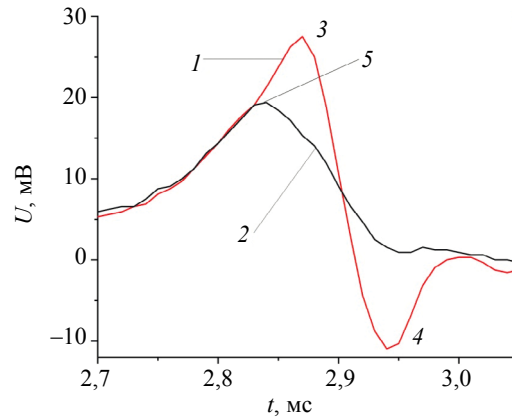


Рис. 10. Прямые зависимости $U(t)$:

1 — с сигналом дефекта; 2 — без сигнала дефекта; 3 и 4 — пики сигналов дефекта; 5 — пик сигнала края дополнительной пластины.

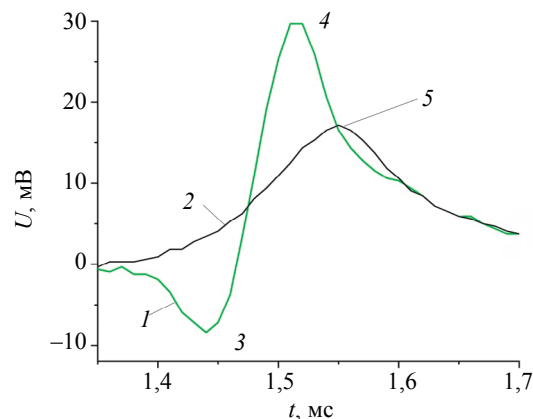


Рис. 11. Обратные зависимости $U(t)$:

1 — с сигналом дефекта; 2 — без сигнала дефекта; 3 и 4 — пики сигналов дефекта; 5 — пик сигнала края дополнительной пластины.

Здесь прямые зависимости получены при сканировании МН магнитной головкой в направлении от края дополнительной пластины к дефекту (как на рис. 8), а обратные — в противоположном направлении. Из рис. 9 находим временные координаты дефекта и отрезок времени между максимумом 3 и минимумом 4, равный 70 мкс, что соответствует диаметру дефекта около 0,08 мм. Отсюда следует, что временные параметры дефекта находятся внутри найденного частотного спектра фона.

Таким образом, выявлен и исследован фон сигнала, обусловленный неоднородностью магнитного поля локального источника, фоны протяженных и локальных дефектов и структурных неоднородностей МН и объекта, эфирный электромагнитный фон. Так, фон сигнала дефекта МН оказывает двойное влияние на полезный сигнал. Во-первых, не осуществляется в полной мере запись поля и воспроизведение сигнала объекта на дефектном участке МН. Во-вторых, происходит

искажение сигнала объекта: резкий спад уровня сигнала на переднем крае дефектного участка и скачек с обратным выбросом на задней границе дефектного и бездефектного участков МН.

В случайные искажения фона сигнала вносят вклад погрешности считывания информации магнитной головкой. Изображенный на рис. 9 фон 2, создаваемый сетевыми, приборными, эфирными и другими помехами, содержит также сигналы помех, создаваемых нарушениями контакта МГ и МН, локальным физическим износом МН, искажениями, вносимыми контактным коллекторным съемом напряжения с вращающейся МГ или локальными нелинейными искажениями сигнала при трансформаторном съеме. Ввиду того, что этот фон зависит также от класса обработки поверхности объекта, царапин, шероховатостей и других поверхностных микроскопических неоднородностей материала объекта, его следует сравнивать с оптическим изображением поверхности объекта, содержащим в объемном виде всю геометрию поверхности.

Анализ графиков, изображенных на рис. 1—7, позволил выявить и исследовать резонансные фоны самовозбуждения измерительной системы на сигналах краев МН, дефектов МН, приборных и сетевых наводок и помех, дефектов объекта, эфирных электромагнитных полей.

Выявлены и исследованы многопараметровые фоны при наложении сигналов разного происхождения (краев МН, неоднородностей МН, локальных дефектов и неоднородностей объекта, приборный и сетевой фон электрических наводок и помех, эфирный электромагнитный фон). В качестве примера представлено наложение и выделение сигналов локального дефекта сплошности и неоднородности объекта в виде его утолщения (см. рис. 8—11).

Установлены закономерности изменения параметров переднего и заднего фронтов сигналов фона разного рода. Временные (пространственные) зависимости сигнала края МН, края дефекта и вызванные другими причинами представлены в цифровом табличном виде и могут быть описаны экспоненциальными, обратными квадратичными функциями и функциями близкого к ним вида. Найден частотный спектр фона помех используемой измерительной системы. Диапазон этого спектра составляет 10 — 200 мкс. При этом линейная скорость движения МГ относительно МН равна 11 м/с. Установка с такими параметрами позволяет выявлять поверхностные дефекты, например, царапины, шириной от 0,005 мм.

При контроле свойств объектов должен быть учтен также фон сигнала, создаваемый формой поверхности объекта, в том числе, валиком сварного шва объектов, изготовленных как из ферромагнитных, так и диамагнитных и парамагнитных металлов.

Найдена резонансная частота используемой измерительной системы. Согласно зависимостям 1 и 2, на рис. 2 она составляет порядка 12 кГц. Величина пиков 3 на рис. 2 (на рисунке они ограничены масштабом изображения) более чем на 15 % превосходит величину пиков 4 на рис. 1, полученных на большем удалении рабочего диапазона измерительной системы от резонансной частоты. Для повышения чувствительности и точности контроля следует устанавливать параметры электрических элементов систем измерения на пороге возникновения в ней свободных колебаний. Проведенные исследования полученного дифференциального фона электрического сигнала позволяют совместно с разработанными авторами ранее методами гистерезисной интерференции в импульсных магнитных полях [5, 7, 15, 16] вести контроль свойств объектов в автоматическом режиме с программным управлением, что значительно повышает чувствительность и точность контроля.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ составляющих фона электрического сигнала, снимаемого с магнитной головки. Выявлены и исследованы следующие фоны $U(t)$: намагниченного магнитного носителя, его краев, локальных дефектов МН (локальных изломов, потертостей, мятых участков МН, поврежденный рабочий слой).

Выявлен и исследован фон сигнала, обусловленный неоднородностью магнитного поля локального источника, фоны протяженных и локальных дефектов и структурных неоднородностей объекта, эфирный электромагнитный фон.

Выявлены и исследованы резонансные фоны самовозбуждения измерительной системы на сигналах краев МН, дефектов МН, приборных и сетевых наводок и помех, дефектов объекта, эфирных электромагнитных полей.

Выявлены и исследованы многопараметровые фоны при наложении и выделении сигналов разного происхождения (краев МН, неоднородностей МН, локальных дефектов и неоднородностей объекта, приборный и сетевой фон электрических наводок и помех, эфирный электромагнитный фон).

Установлены закономерности изменения параметров переднего и заднего фронтов сигналов фона разного рода. Временные (пространственные) зависимости сигнала края МН, края дефекта и вызванные другими причинами представлены в цифровом табличном виде и могут быть описаны экспоненциальными, обратными квадратичными функциями и функциями близкого к ним вида.

Показано, что резонансные пики являются следствием самовозбуждения измерительной системы, включающей МГ. Эти пики возникают при приближении частоты локальных изменений $U(t)$ к частоте собственных колебаний этой измерительной системы. Путем корректировки активных и реактивных сопротивлений в контуре, содержащем МГ, получены свободные гармонические колебания на нисходящих ветвях пиковых участков $U(t)$ с разной амплитудой и коэффициентом затухания. При этом возникли также первые резонансные пики, являющиеся продолжением нисходящих ветвей пиков сигнала. Установлено, что резонансные пики возникают на задних фронтах любых сигналов достаточной величины, длительность заднего фронта которых составляет порядка четверти периода собственных колебаний измерительной системы.

Получены временные зависимости величины сигнала дефектов объекта и дефектов МН, снимаемого с МГ, на разных расстояниях МГ до магнитного носителя, учет которых позволяет повысить точность контроля.

При контроле свойств объектов должен быть учтен также фон сигнала, создаваемый формой поверхности объекта, в том числе, валиком сварного шва объектов, изготовленных как из ферромагнитных, так и диамагнитных и парамагнитных металлов.

Найден частотный спектр фона помех используемой измерительной системы. Диапазон этого спектра начинается со времени дискретизации измерений используемого цифрового осциллографа 10 мкс и заканчивается согласно параметрам представленных экспериментальных зависимостей величиной порядка 200 мкс. Указанный фон содержит также сигналы помех, создаваемых нарушением контакта МГ и МН, локальным физическим износом МН, искажениями, вносимыми контактным коллекторным съемом напряжения с вращающейся МГ или локальными нелинейными искажениями сигнала при трансформаторном съеме. Этот фон зависит также от класса обработки поверхности объекта, параметров царпин, шероховатостей и других поверхностных микроскопических неоднородностей материала объекта и его следует сравнивать с оптическим изображением поверхности объекта.

Установлено, что в промежутке между пиками, соответствующими краям участков МН, участок зависимости $U(t)$ является отрезком горизонтальной прямой, а с увеличением амплитуды сигнала угол его наклона к горизонту растет и на этом отрезке появляются минимумы и максимумы сигнала. С увеличением амплитуды воздействующего магнитного поля величина этих максимумов и минимумов растет и достигает величины пиковых значений сигнала от краев МН.

Найдена резонансная частота используемой измерительной системы. Для повышения чувствительности и точности контроля рекомендовано устанавливать такие параметры электрических элементов систем измерения, которые выводят измерительную систему в состояние, близкое к состоянию возбуждения в ней свободных колебаний.

Проведенные исследования полученного дифференциального фона электрического сигнала, снимаемого с индукционной магнитной головки, позволяют совместно с найденными авторами ранее амплитудными и частотными спектрами импульсных магнитных полей при осуществлении гистерезисной интерференции вести контроль свойств объектов в автоматическом режиме с программным управлением, что значительно повышает чувствительность и точность контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.С. Техника магнитографической дефектоскопии. Мн.: Вышэйшая школа, 1976. 256 с.
2. Михайлов С.П., Щербинин В.Е. Физические основы магнитографической дефектоскопии. М.: Наука, 1992. 238 с.
3. Жданов А.Г., Щукис Е.Г., Лунин В.П., Столяров А.А. Алгоритмы предварительной обработки вихрековых сигналов при контроле теплообменных труб парогенераторов АЭС // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 54—64.
4. Суханов Д.Я., Гончарик М.А. Определение формы электропроводящего объекта по дистанционным измерениям возмущений переменного магнитного поля // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 41—43.
5. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Using magnetic hysteresis for testing electroconductive objects in pulsed magnetic fields // Russ. J. Nondetr. Test. 2013. V. 49. No. 6. P. 334—346.

6. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Выявление дефектов сплошности в образцах из алюминия магнитоимпульсным методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 4. С. 28—32.

7. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S., Pivovarov V.L. Computer-assisted methods for finding pulsed magnetic-field distributions near current-conducting objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 3. P. 166—174.

8. Новослугина А.П., Смородинский Я.Г. Анализ топографии магнитных полей рассеяния в ферромагнитных изделиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 2. С. 33—37.

9. Черепанов А.А., Кротов Л.Н., Кротова Е.Л. Математическое моделирование определения геометрических параметров внутренних дефектов различных форм методом магнитной дефектоскопии // Перспективы науки. 2013. № 12 (51). С. 60—63.

10. Крапивский Е.И., Абакумов А.А., Венков Ю.А. Экспериментальное исследование магнитного поля рассеяния от дефектов трубопровода // Газовая промышленность. 2015. № 2 (718). С. 64—66.

11. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Поле рассеяния пластины с поверхностным дефектом в однородном внешнем поле // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 22—29. [Dyakin V.V., Kudryashova O.V. Stray Field of Plate with a Surface Defect in a Homogeneous External Field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 12. P. 840—848.]

12. Гальченко В.Я., Остапущенко Д.Л., Воробьев М.А. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений // Дефектоскопия. 2009. № 3. С. 56—66.

13. Новиков В.А., Терешко А.М. Применение постоянных магнитов для магнитографической дефектоскопии изделий // Дефектоскопия. 1998. № 7. С. 67—71.

14. Новослугина А.П., Смородинский Я.Г. Расчетный способ оценки параметров дефектов в сталях // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 13—19.

15. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Hysteretic Interference of Time-Overlapping Magnetic Field Pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 949—956.

16. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Imaging Electric Signals of a Magnetic Field Transducer with Hysteretic Interference for Testing Metals in Pulsed Magnetic Fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 907—914.