

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ КОНТРОЛЕ ОБЪЕКТОВ ИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В.В. Павлюченко, Е.С. Дорошевич

Приведены распределения электрического напряжения $U(t)$, снимаемого с индукционной магнитной головки при сканировании ею дискретного магнитного носителя с записями остаточных магнитных полей, полученных при воздействии на магнитный носитель с контролируемым объектом импульсным магнитным полем с выбросами разной полярности. Возникновение упорядоченных распределений остаточных магнитных полей на магнитном носителе в результате последовательного воздействия на него импульсами магнитного поля названо гистерезисной интерференцией импульсного магнитного поля (НИ). Описаны схема экспериментальной установки для исследования распространения импульсных магнитных полей, а также способы контроля объектов из электропроводящих и магнитных материалов, повышающие точность определения их удельной электропроводности σ , магнитной проницаемости μ , однородности распределения σ и μ , толщины и параметров дефектов сплошности в них.

Ключевые слова: напряженность магнитного поля, тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля, удельная электропроводность, магнитная проницаемость, магнитный носитель, индукционная магнитная головка.

Перечень условных обозначений

- σ — удельная электропроводность материала;
- μ — относительная магнитная проницаемость;
- H — величина напряженности магнитного поля;
- H_t — величина тангенциальной составляющей H ;
- H_{tm} — величина максимальной H_t ;
- t_{max} — время нарастания импульса магнитного поля;
- d — толщина объекта;
- МН — магнитный носитель;
- МГ — магнитная головка;
- ДДМП — дискретный датчик магнитного поля;
- НИ — гистерезисная интерференция импульсного магнитного поля.

Цель настоящей работы — разработка способов контроля объектов из электропроводящих и магнитных материалов, повышающих точность определения их удельной электропроводности σ , магнитной проницаемости μ , однородности распределения σ и μ , толщины и параметров дефектов сплошности в них.

Воздействие на магнитный носитель, например, на магнитную ленту, переменным магнитным полем с медленно убывающей амплитудой напряженности приводит к размагничиванию МН. При достаточно быстром уменьшении амплитуды действующего магнитного поля возникает остаточная намагниченность МН. Распределение этой намагниченности зависит от параметров импульсного магнитного поля и от пространственного распределения тангенциальной H_{tm} и нормальной H_{nm} составляющих напряженности магнитного поля, приложенного к МН. Распределения напряженности магнитного поля источника импульсного магнитного поля вблизи поверхности металлических объектов представлены на рис. 1, где показан импульс тока I (штриховая кривая) в виде затухающей синусоиды, состоящей из трех по-

лупериодов, а также совпадающий с ним (в соответствии с выбранным масштабом) импульс I напряженности магнитного поля H в отсутствие объекта и импульс напряженности магнитного поля 2 вблизи поверхности объекта в результате воздействия на объект полем импульса тока i линейного индуктора.

На рис. 1 изображены также излучатель 3 , по которому течет ток i , МН 4 с проекцией оси излучателя a , поверхность объекта 5 с обозначениями рас-

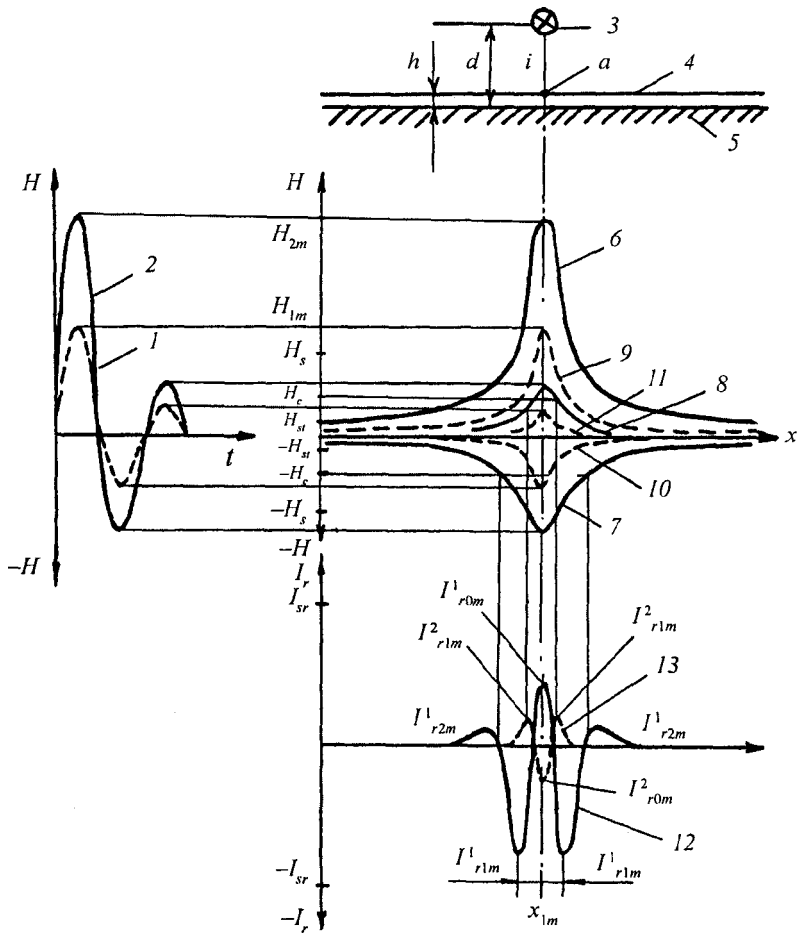


Рис. 1. Схематическое изображение перемагничивания датчика магнитного поля:

I — импульс тока; 2 — импульс напряженности магнитного поля; 3 — излучатель; 4 — магнитный носитель; 5 — поверхность объекта; $6-11$ — распределения максимальной напряженности магнитного поля вблизи поверхности объекта; 12 и 13 — распределения остаточной намагниченности магнитного носителя.

стояния от поверхности объекта до оси излучателя d и до МН h и показаны распределения напряженности магнитного поля на поверхности образца 6 , 7 и 8 соответственно для первого, второго и третьего полупериодов импульса 2 в зависимости от расстояния x до проекции излучателя a , распределения 9 , 10 и 11 соответственно для первого, второго и третьего полупериодов импульса I . Здесь же показаны распределения остаточной намагниченности J_r МН 12 и 13 в результате воздействия на МН магнитными полями соответственно импульсов 2 и I . На рис. 1 через J_{sr} обозначена остаточная намагниченность насыщения МН.

Воздействуют на объект 5 с приложенным к нему МН 4 магнитным полем затухающего синусоидального импульса тока I линейного излучателя 3, расположенного параллельно поверхности объекта 5, создавая вблизи нее большую величину напряженности магнитного поля (кривая 2) по сравнению с напряженностью поля в отсутствие объекта (кривая 1).

В результате нескольких затухающих колебаний напряженности магнитного поля вблизи поверхности объекта с последовательно возникающими распределениями напряженности b — 8 на МН остается распределение остаточной намагниченности, соответствующее кривой 12, в данном случае с пятью максимумами разной полярности. Это распределение существенно отличается от распределения 13, полученного в отсутствие объекта на том же удалении МН от излучателя с зависимостями напряженности магнитного поля 9—11, соответствующими изменению напряженности магнитного поля 1. Так, нулевые максимумы (под осью излучателя) остаточных намагниченностей J_{r0m}^1 и J_{r0m}^2 соответственно для кривых 1 и 2 имеют разные знаки и различаются вдвое по абсолютной величине.

Максимумы J_{r1m}^1 и J_{r1m}^2 , J_{r2m}^1 и J_{r2m}^2 также отличаются друг от друга. Каждому материалу объекта соответствует свое распределение остаточной намагниченности МН. Точность определения свойств объекта значительно повышается за счет изменения по величине и знаку остаточных намагниченностей нулевого максимума, то есть расположенных на оси a (на рис. 1 они разного знака), и за счет появления дополнительной информации в виде других максимумов с разными расстояниями между ними.

Способ применен для контроля объектов из алюминия, меди, свинца и других металлов при толщине образцов $(0,015—5,0) \times 10^{-3}$ м и при изменении периодов синусоид от 8×10^{-5} с до 3×10^{-4} с. Наиболее точные результаты измерения получены при использовании магнитной ленты в качестве МН. Например, воздействовали на пластину из алюминия импульсом магнитного поля со следующими параметрами: период колебаний 8×10^{-5} с, $U_{1m} = 45 \times 10^3$ А/м, затухание за период 15×10^3 А/м. Коэрцитивная сила датчика по остаточной намагниченности 28×10^3 А/м. Пространственное расположение оси индуктора и МН относительно поверхности объекта: $d = 4 \times 10^{-3}$ м, $h = 1,5 \times 10^{-4}$ м. При измерении амплитуды напряжения с МГ без использования гистерезиса МН получено: в отсутствие объекта $U_{1m} = 45 \times 10^3$ А/м, а для пластины из алюминия толщиной 5 мм — $U_{2m} = 80 \times 10^3$ А/м. Таким образом, получено увеличение электрического напряжения в 1,78 раза. Разработанным способом затухающих колебаний получено следующее распределение остаточных намагниченностей МН: в отсутствие объекта нулевой максимум $J_{r0m}^2 = 0,80J_{sr}$, первый максимум $J_{r1m}^2 < 0,05J_{sr}$, для объекта из алюминия нулевой максимум $J_{r0m}^1 = 0,03J_{sr}$, первый максимум $J_{r1m}^1 = 0,50J_{sr}$, расстояние между первыми максимумами $x_{1m} = 2 \times 10^{-2}$ м. Получено уменьшение остаточной намагниченности нулевого максимума в 27 раз ($J_{r0m}^1 = 0,03J_{sr}$; $J_{r0m}^2 = 0,80J_{sr}$). Получена также дополнительная информация о свойствах объекта: расстояние между максимумами $x_{1m} = 2 \times 10^{-2}$ м и увеличение амплитуды первых максимумов в 10 раз ($J_{r1m}^2 < 0,05J_{sr}$; $J_{r1m}^1 = 0,50J_{sr}$) по сравнению с измерениями в отсутствие объекта.

Способ позволяет повысить точность контроля в несколько раз за счет получения информации о свойствах объекта в виде распределений остаточной намагниченности с максимумами разной амплитуды и полярности и разными расстояниями между ними.

Для измерения величины H_{cm} из МН изготавливали ДДМП, представляющий собой набор параллельных полос равной ширины, укрепленных на

гибкой основе на одинаковом удалении друг от друга. На ДДМП проводили запись H_{tm} . Путем сканирования ДДМП магнитной головкой, подключенной к входу цифрового осциллографа, находили величину индуцированного МГ напряжения, по которой в соответствии с градуировочными характеристиками МН определяли величину H_{tm} . Воспроизведение индукционной МГ осуществляли в направлении, перпендикулярном осям полос. Расстояние между магнитными полосами равно их ширине.

При вырезании магнитных полос из сплошного МН никакого существенного изменения магнитных свойств МН не происходит, так как используемый МН состоит из высококоэрцитивных магнитных частиц микроскопического размера. Если при резке МН и возникают какие-либо изменения в его магнитных свойствах, то они учитываются при построении характеристик каждого конкретного ДДМП, то есть зависимостей величины считываемого с МГ электрического напряжения U от величины напряженности магнитного поля H .

Существенное отличие градуировочных характеристик ДДМП от аналогичных зависимостей сплошного МН может возникать вследствие инерционных свойств воспроизводящей МГ. Чем больше постоянная времени МГ, тем меньше пики от краев магнитных полос ДДМП. Величина пиков электрического напряжения U от краев магнитных полос пропорциональна величине напряженности магнитного поля. Таким образом, с помощью ДДМП можно определять абсолютную величину напряженности магнитного поля. При этом ввиду очень большой анизотропии магнитных свойств МН, используемых авторами, в плоскости МН и в перпендикулярном ему направлении с помощью таких ДДМП находили величину тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля.

Ширина магнитных полос ДДМП, используемых в данной работе, составляет $2 \cdot 10^{-4}$ м и $3 \cdot 10^{-4}$ м. Минимальная ширина магнитных полос может составлять несколько десятков атомных расстояний и определяется размерами магнитных частиц и параметрами воспроизводящего устройства, которым может быть не только МГ, но и магнитооптическая пленка, магнитные флюкс-детекторы и устройства из других материалов. Кроме того, сами ДДМП могут быть изготовлены из магнитооптической пленки или флюкс-детекторов, а считывание с них информации может быть осуществлено соответственно с помощью поляризованного или неполяризованного света.

Так как при считывании с ДДМП сигнал возникает от обоих краев магнитных полос с разной полярностью, то использование ДДМП позволяет удваивать величину измеряемого напряжения U . Кроме того, благодаря двухполярным сигналам легко определить нулевой уровень сигнала и получаемые распределения U во времени являются симметричными, что повышает возможности визуальной или автоматической обработки информации. Погрешности измерений, вносимые отклонениями ширины магнитных полос и участков между ними от среднего размера, а также погрешности, вносимые локальными отклонениями свойств участков магнитных полос, уменьшаются благодаря разработанным способам контроля, позволяющим записывать и учитывать индивидуальные свойства всех участков ДДМП. ДДМП могут быть изготовлены из разных магнитных материалов. В результате резки полос из магнитомягкого материала образуются огромные скопления дислокаций, которые могут уменьшать магнитную проницаемость в десятки и сотни раз. Однако представленные в работе датчики изготовлены из высококоэрцитивных материалов и при резке их структура и магнитные свойства МН практически не изменяются.

Измерения проведены на тиристорной установке, схема которой показана на рис. 2. Установка работает следующим образом. Зарядив накопительные конденсаторы 9 тиристора 5 от источника питания 2, переключают тумблер его управления в блоке управления и коммутации 8 в положение “разряд” и замыканием электрического ключа 13 осуществляют разряд этих конденсаторов на источник импульсного магнитного поля 1 через тиристор 5 и

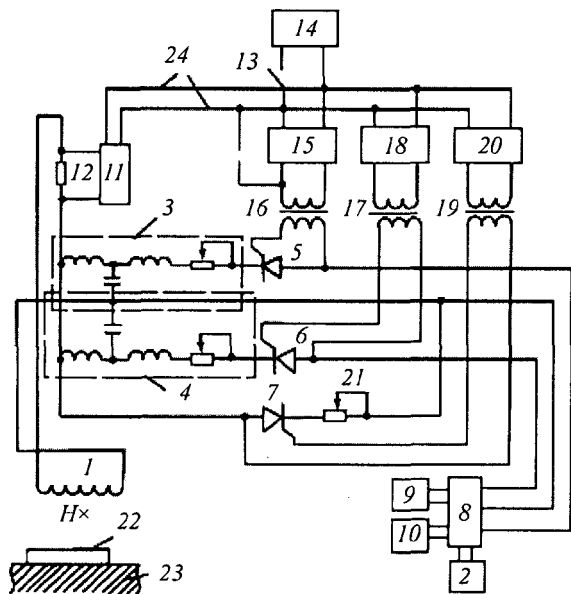


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования распространения импульсных магнитных полей:

1 — излучатель импульсного магнитного поля; 2 — источник питания; 3 и 4 — формирующие линии; 5—7 — тиристоры; 8 — блок управления; 9 и 10 — накопительные конденсаторы; 11 — измерительный прибор; 12 — измерительное сопротивление; 13 — электрический ключ; 14 — источник постоянного напряжения; 15 — электронная схема; 16 и 17 — трансформаторы запуска тиристоров; 18 — электронная схема; 19 — трансформатор запуска тиристора; 20 — электронная схема; 21 — потенциометр; 22 — датчик магнитного поля; 23 — металлический объект; 24 — линия синхронизации.

формирующую линию 3. Параметры импульса тока источника импульсного магнитного поля 1 определяются величиной напряжения на источнике питания 2, величиной емкости накопительных конденсаторов 9, величиной индуктивности, емкостью и активного сопротивления формирующей линии 3, а также линейными размерами, числом витков, толщиной и электрическим сопротивлением провода источника поля 1. С помощью цепи тиристора 5 можно формировать импульсы тока в полволны, импульсы, по форме близкие к треугольнику, а также квазилинейно нарастающие импульсы с экспоненциальным спадом.

Цепь тиристора 6 служит для формирования импульсов тока более сложной формы. Задают параметры формирующей линии 4 тиристора 6 и время задержки t_3 его линии задержки в схеме 18, коммутируют цепь заряда накопительных конденсаторов 10 из положения “заряд” в положение “разряд”. Затем замыкают ключ 13, осуществляя разряд конденсаторов 9 на источник поля 1 и с момента времени t_3 — разряд конденсаторов 10 через тиристор 6 и линию задержки 4. Цепь тиристора 6 позволяет формировать среднюю часть и задний фронт импульса тока. С помощью тиристора 7 осуществляют формирование заднего фронта импульса тока 1 на источнике 1. Момент его срабатывания задают временем задержки его линии задержки в схеме 20. Время

спада тока в источнике поля I определяется величиной активного сопротивления $2I$ в цепи тиристора 7, включенного параллельно источнику поля I . Знаком \times показано направление создаваемой источником I напряженности магнитного поля H .

В качестве измерительного прибора использовали цифровые осциллографы, подключенные к монитору. Установка позволяет проводить измерения в диапазоне напряженности магнитного поля 1×10^2 — 1×10^5 А/м при минимальном времени нарастания напряженности магнитного поля 1×10^{-6} с.

Установка позволяет формировать следующие виды импульсов магнитного поля: 1 — импульс в полволны; 2 — четверть синусоиды — экспонента; 3 — импульс в полволны с одним обратным выбросом; 4 — импульс в полволны с несколькими обратными выбросами; 5 — линейно нарастающий и линейно убывающий импульс; 6 — импульс в виде трапеции; 7 — импульс, состоящий из трех линейных участков; 8 — линейно нарастающий и спадающий линейно или экспоненциально импульс.

Все представленные ниже рисунки получены с помощью цифрового осциллографа, подключенного к монитору.

Воздействуем на ДДМП импульсом магнитного поля, соответствующим импульсу тока, проходящего через линейный индуктор и изображенного на рис. 3. Ось излучателя импульсного магнитного поля параллельна магнитным полосам ДДМП.

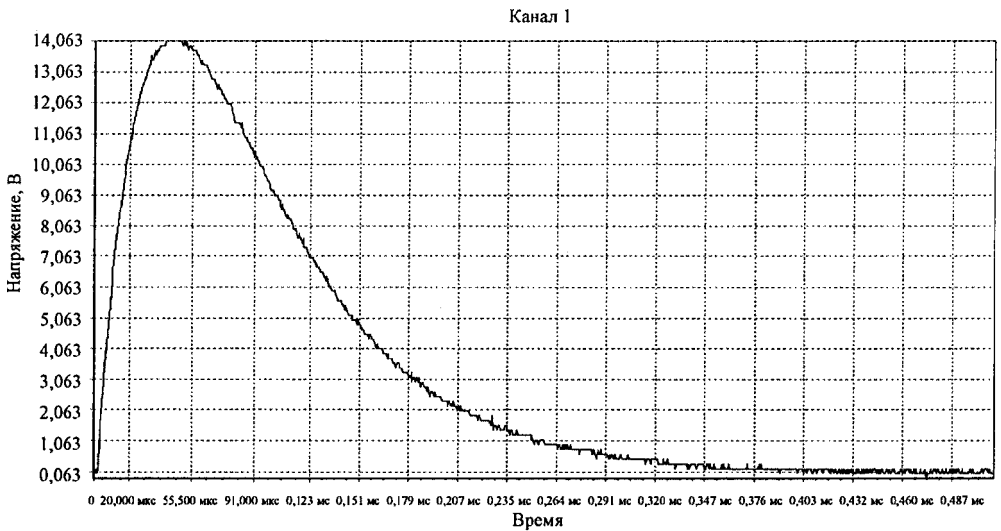


Рис. 3. Зависимость $U(t)$, снятая с измерительного сопротивления источника магнитного поля.

Результаты воздействия указанным однополярным импульсом магнитного поля с максимальной величиной напряжения 14,75 В на ДДМП представлены на рис. 4. Положение проекции оси излучателя магнитного поля соответствует максимуму сигнала $U(t)$ в момент времени $t_{1\max} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ с. Положения двух минимумов: $t_{1\min} = 0$; $t_{2\min} = 2,8 \cdot 10^{-3}$ с. Расстояние оси излучателя до плоскости измерения $6 \cdot 10^{-3}$ м. Масштаб изображения: $1 \cdot 10^{-3}$ с соответствует $1,1 \cdot 10^{-2}$ м.

Воздействуем на ДДМП с записью поля первого импульса вторым импульсом магнитного поля, соответствующим импульсу тока, изображенному на рис. 3 с максимальной величиной напряжения 7,375 В и противоположной полярностью.

В результате получаем распределение $U(t)$, изображенное на рис. 5 и содержащее три максимума в точках $t_{1\max} = 2,6 \cdot 10^{-4}$ с; $t_{2\max} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ с (со-

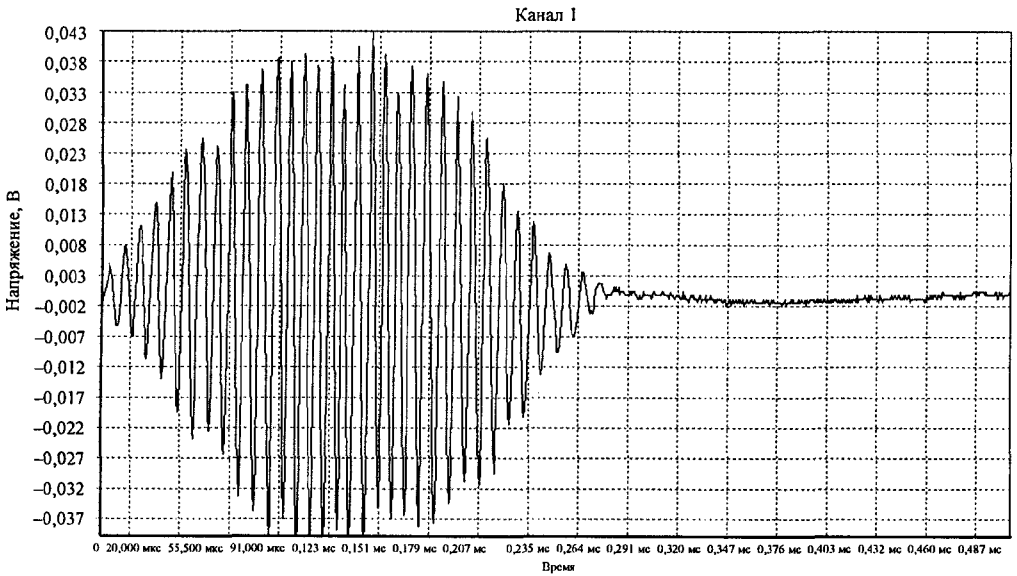


Рис. 4. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ: воздействие на ДДМП одним импульсом поля вида, показанного на рис. 3.

ответствует положению проекции оси излучателя импульсного магнитного поля, нулевой максимум); $t_3 = 2,3 \cdot 10^{-3}$ с и четыре минимума $t_{1\min} = 0$; $t_{2\min} = 5 \cdot 10^{-4}$ с; $t_{3\min} = 2 \cdot 10^{-3}$ с; $t_{4\min} = 2,6 \cdot 10^{-3}$ с.

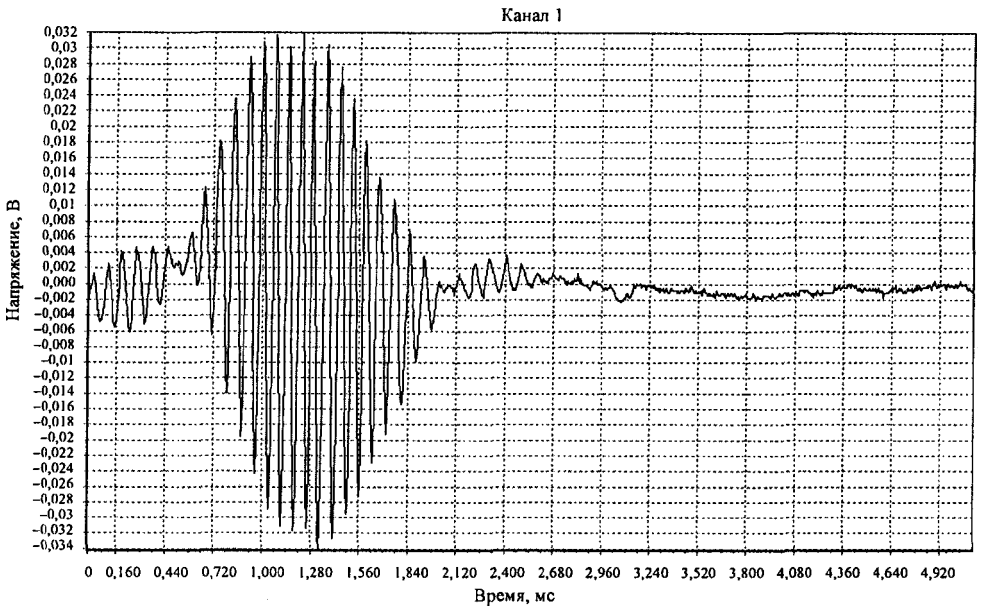


Рис. 5. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ:

воздействие на ДДМП двумя разнополярными импульсами поля вида, показанного на рис. 3, с разными амплитудами.

Воздействуем на ДДМП с записями полей первого и второго импульсов третьим импульсом магнитного поля, соответствующим импульсу тока, изо-

браженного на рис. 3 с максимальной величиной напряжения 2,031 В и противоположной второму импульсу полярностью. В результате получаем распределение $U(t)$, изображенное на рис. 6 и содержащее четыре максимума в точках $t_{1\max} = 5,8 \cdot 10^{-4}$ с; $t_{2\max} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ с; $t_{3\max} = 1,9 \cdot 10^{-3}$ с; $t_{4\max} = 2,6 \cdot 10^{-3}$ с и пять минимумов $t_{1\min} = 0$; $t_{2\min} = 8 \cdot 10^{-4}$ с; $t_{3\min} = 1,7 \cdot 10^{-3}$ с (соответствует положению оси излучателя импульсного магнитного поля, нулевой минимум); $t_{4\min} = 2,4 \cdot 10^{-3}$ с; $t_{5\min} = 2,9 \cdot 10^{-3}$ с.

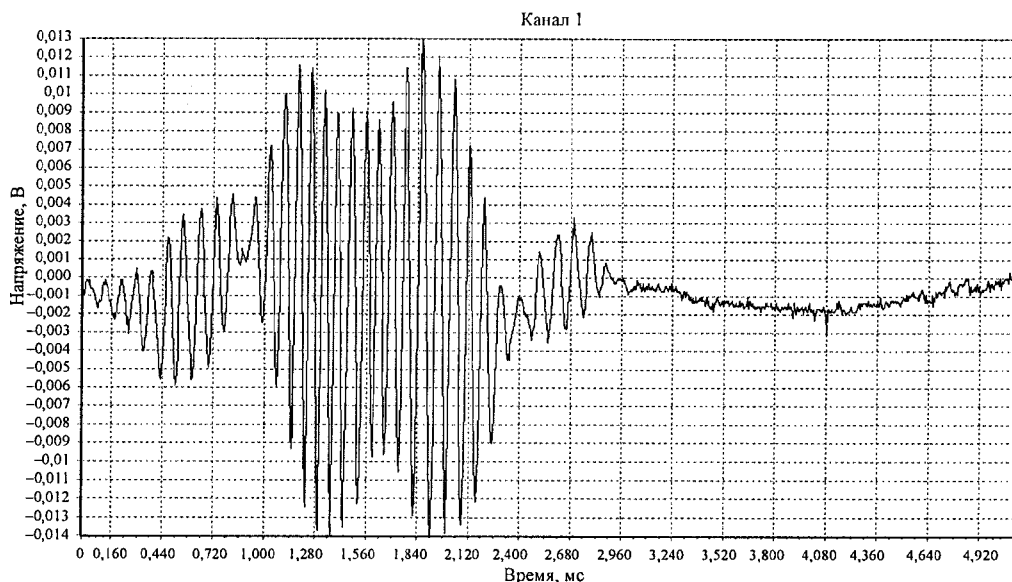


Рис. 6. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ:

воздействии на ДДМП тремя разнополярными импульсами поля вида, показанного на рис. 3, с разными амплитудами.

Величина $U(t)$ пропорциональна величине H измеряемого поля.

Явление возникновения упорядоченных распределений остаточных магнитных полей на магнитном носителе в результате последовательного воздействия на него импульсами магнитного поля мы назвали гистерезисной интерференцией импульсного магнитного поля на магнитном носителе (HI).

В случае линейного излучателя поля по аналогии с интерференцией электромагнитных волн можно ввести понятия максимумов и минимумов интерференции. Считаем, что под осью излучателя находится нулевой максимум или нулевой минимум. Порядок максимума или минимума определяем по тому, сколько раз на соответствующем ему участке МН произошло перематничивание.

Тогда на рис. 4 имеем нулевой максимум первого порядка и два минимума первого порядка, на рис. 5 — нулевой максимум второго порядка ($1,3 \cdot 10^{-3}$ с) и два максимума первого порядка, а также два минимума второго порядка ($5 \cdot 10^{-4}$ с и $2 \cdot 10^{-3}$ с) и два минимума первого порядка, на рис. 6 — два максимума второго порядка ($1,3 \cdot 10^{-3}$ с, $1,9 \cdot 10^{-3}$ с) и два максимума первого порядка, нулевой минимум третьего порядка ($1,7 \cdot 10^{-3}$ с), два минимума второго порядка ($8 \cdot 10^{-4}$ с, $2,4 \cdot 10^{-3}$ с), два минимума первого порядка. Осуществить явление HI можно с помощью одного импульса сложной формы, например, с использованием импульса, изображенного на рис. 7.

В результате воздействия ДДМП указанным импульсом поля получается распределение $U(t)$, показанное на рис. 8 с максимумами второго и первого порядка и минимумами первого, второго и третьего порядка.

Явление HI может быть использовано в неразрушающем контроле и позволяет значительно повысить его точность.

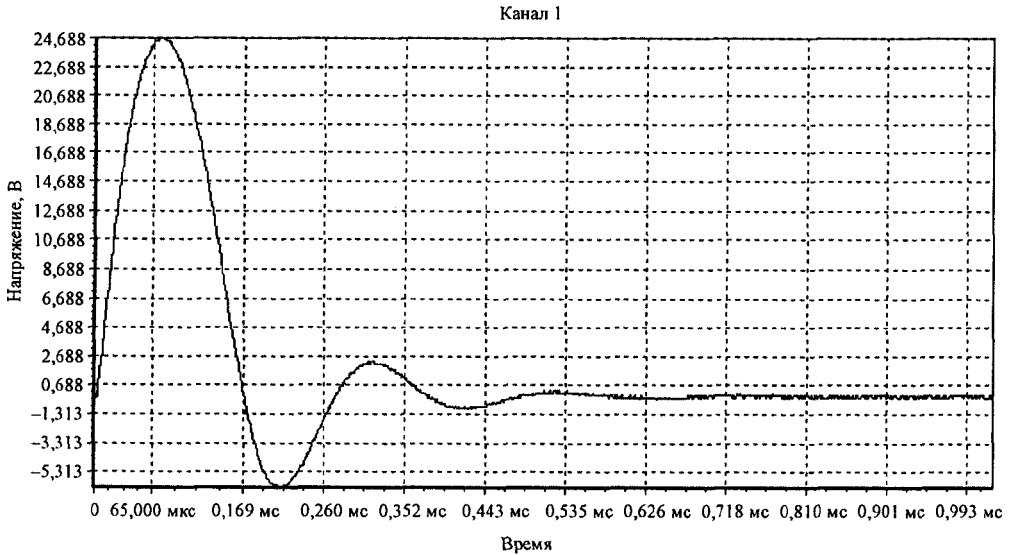


Рис. 7. Зависимость $U(t)$, снятая с измерительного сопротивления источника магнитного поля.

Применение способа контроля толщины пластины из электропроводящего материала с использованием одного выброса поля представлено на рис. 9—13. На рис. 9 показан импульс тока источника первичного магнитного поля.

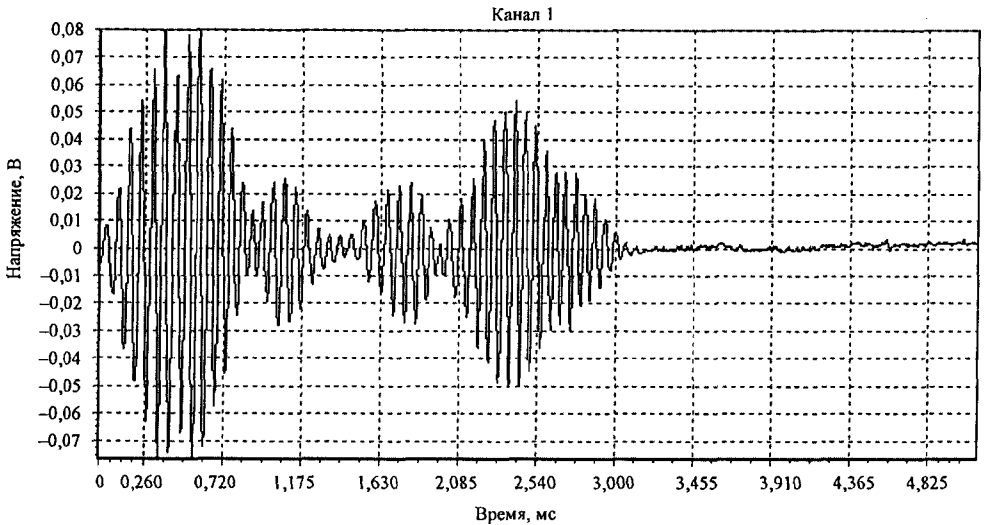


Рис. 8. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ:

импульс поля записи на ДДМП показан на рис. 7.

На рис. 10—13 показаны распределения $U(t)$ для пластин разной толщины.

Из анализа этих рисунков следует, что использование HI позволяет повысить точность контроля. Так, предельное значение величины $H_{\text{тн}}$ вблизи

поверхности электропроводящего материала не может превышать величину напряженности первичного магнитного поля более чем в 2 раза. Из данных,

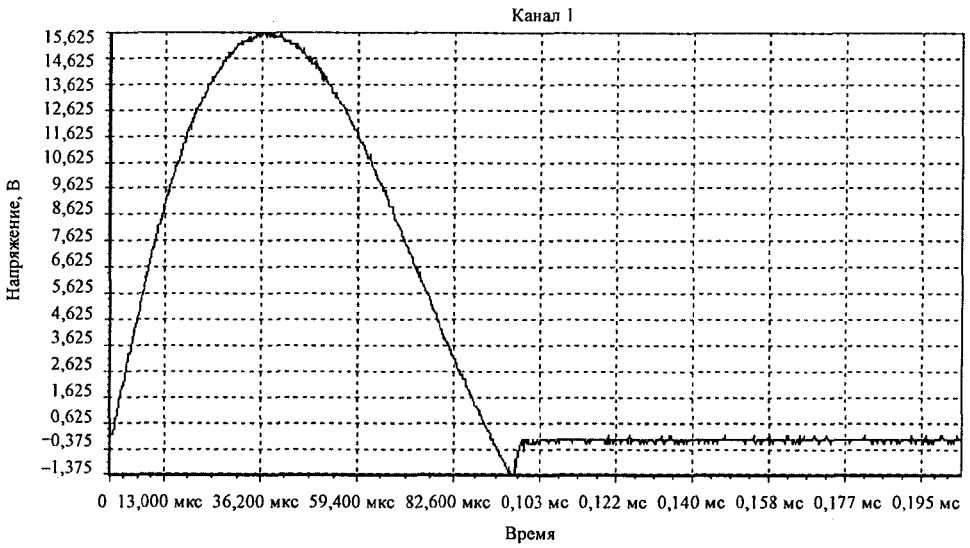


Рис. 9. Зависимость $U(t)$, снятая с измерительного сопротивления источника магнитного поля.

представленных в [2], можно заключить, что при воздействии на пластину из алюминия импульсом магнитного поля с таким же временем нарастания

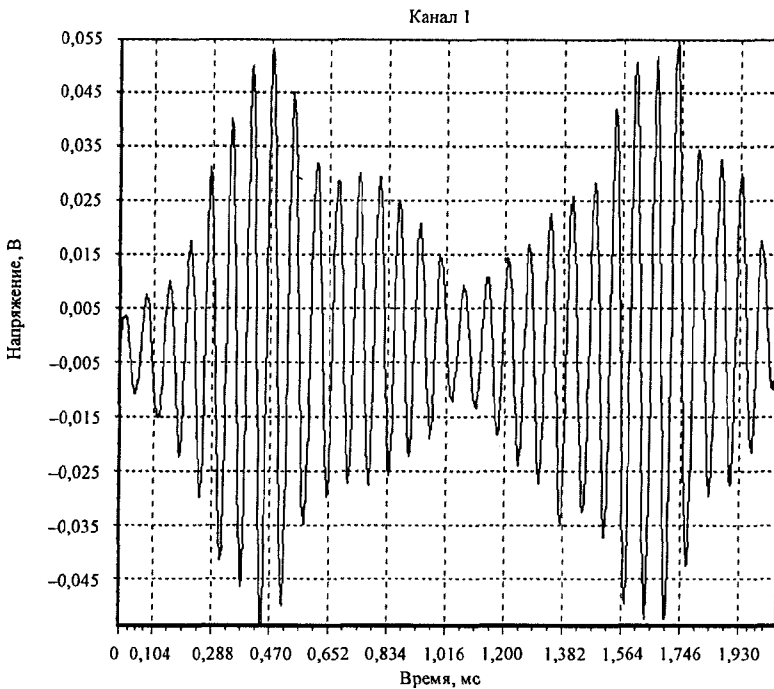


Рис. 10. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ:

пластина из алюминия толщиной $8,5 \cdot 10^{-5}$ м, импульс поля записи на ДДМП показан на рис. 9.

t_{\max} увеличение толщины пластины с $1 \cdot 10^{-4}$ м до $1,3 \cdot 10^{-4}$ м приводит к увеличению $H_{\text{тн}}$ вблизи поверхности пластины из алюминия в 1,15 раза, что соот-

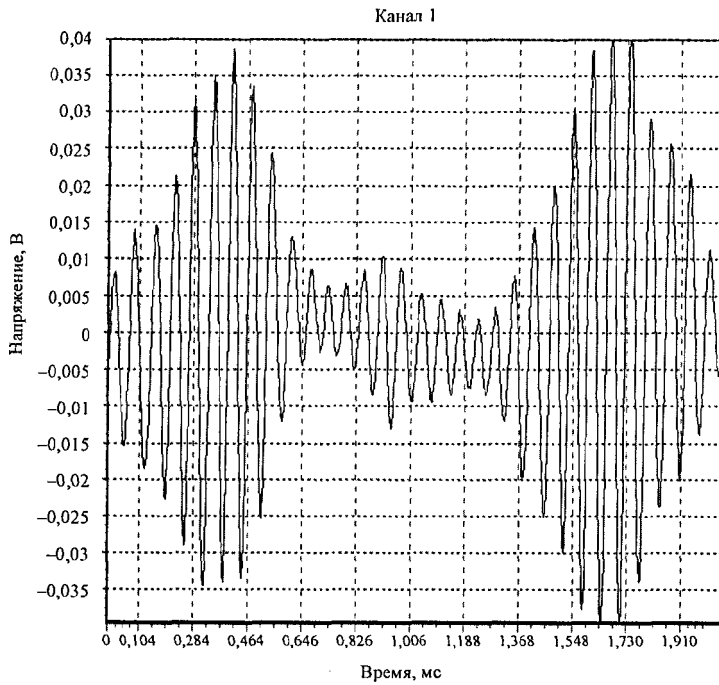


Рис. 11. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ: пластина из алюминия толщиной $1,15 \cdot 10^{-4}$ м, импульс поля записи на ДДМП показан на рис. 9.

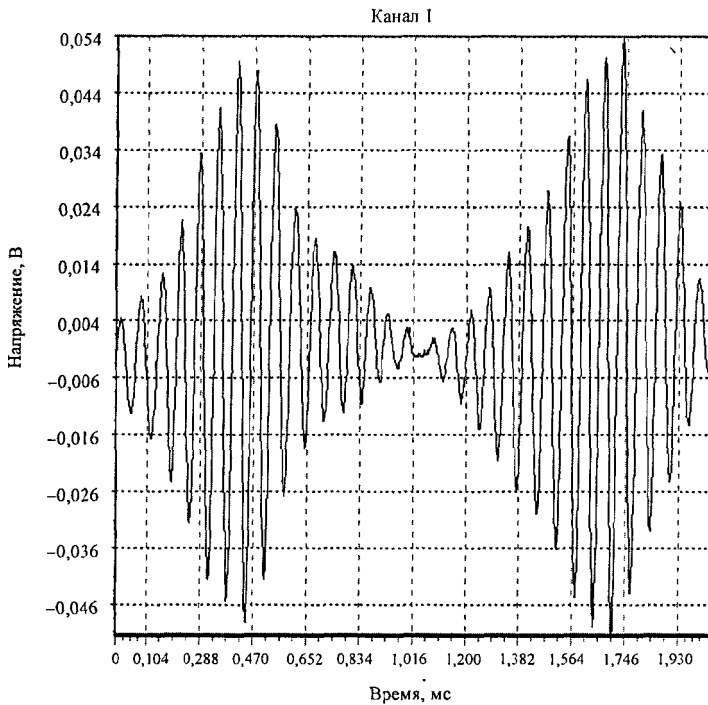


Рис. 12. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ: пластина из алюминия толщиной $1,0 \cdot 10^{-4}$ м, импульс поля записи на ДДМП показан на рис. 9.

ветствует увеличению $U(t)$ с $8,2 \cdot 10^{-2}$ В до $8,8 \cdot 10^{-2}$ В. Тогда в пересчете на диапазон регистрации с верхним пределом $6 \cdot 10^{-2}$ В получаем, что диапазон измерения составляет $4,5 \cdot 10^{-3}$ В. Предел допускаемой относительной погрешности находим по формуле $\delta = \pm \frac{\Delta \cdot 100}{x} \%$, где Δ — предел допускаемой абсолютной погрешности. При измерении предложенным способом диапазон измерений равен $5,9 \cdot 10^{-2}$ В (нулевой максимум второго порядка при

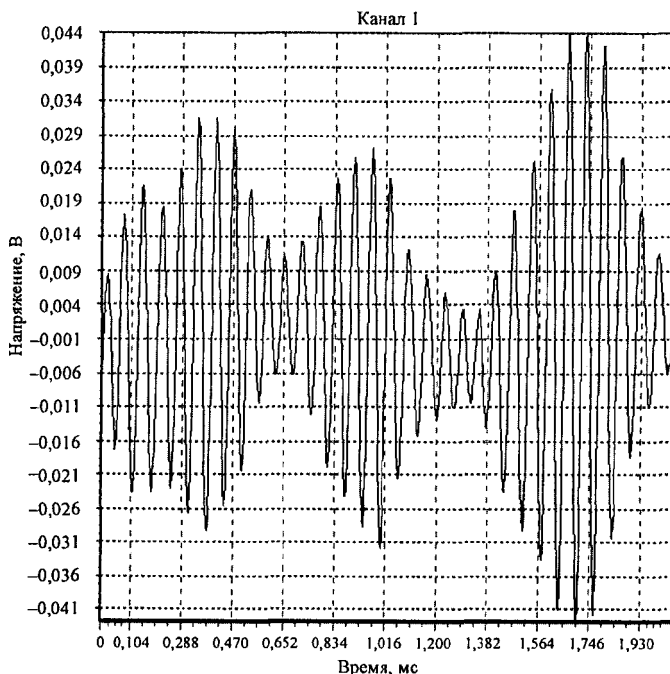


Рис. 13. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ: пластина из алюминия толщиной $1,3 \cdot 10^{-4}$ м, импульс поля записи на ДДМП показан на рис. 9.

$t = 1 \cdot 10^{-3}$ с на рис. 13 равен $x_2 = 5,9 \cdot 10^{-2}$ В, нулевой минимум второго порядка при $t = 1 \cdot 10^{-3}$ с равен нулю на рис. 12). Отношение пределов допускаемой относительной погрешности δ в данном случае равно отношению обратных величин их диапазонов регистрации сигналов ($4,5 \cdot 10^{-3}$ В и $5,9 \cdot 10^{-2}$ В). Таким образом, точность измерений повысилась в 13 раз по сравнению с измерениями без использования гистерезиса.

Погрешности измерения с использованием предложенного способа одного порядка и даже меньше погрешностей современных токовихревых способов и устройств.

Для определения величины H_m проведена градуировка ДДМП с использованием его гистерезисных свойств и получена градуировочная характеристика ДДМП

$$U = 186 - 1,6 \cdot 10^2 H,$$

где U — амплитуда электрического напряжения на выходе МГ; H — величина напряженности магнитного поля. Все представленные величины имеют относительные размерности. Отсюда получено

$$H = 0,625(186 - U) \cdot 10^2 \text{ А/м.}$$

Абсолютная погрешность $\Delta H = 0,625 \cdot 10^2 \cdot \Delta U$ А/м. Значение предела допускаемой основной приведенной погрешности при измерении напряжения по отношению к диапазону регистрации сигналов при коэффициенте отклонения $5 \cdot 10^{-3}$ В/дел используемого цифрового осциллографа составляет 1%,

то есть $5 \cdot 10^{-4}$ В. Тогда относительная погрешность $\delta = \frac{0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,625 \cdot 100 \%}{U_x}$,

где U_x — диапазон, соответствующий измеряемой величине. При $U_x = 59 \cdot 10^{-3}$ В получаем величину относительной погрешности $\delta = 0,53$ %. Так как изменение толщины пластины составляет 30 % (рис. 12, 13), то относительная погрешность равна 0,16 %. С учетом других погрешностей, возникающих при определении толщины объекта указанным способом, суммарная погрешность составляет 1—2 %.

Измерения, при которых величину нулевого максимума (минимума) для определенной толщины объекта устанавливают равной нулю или близкой к нулю, позволяют делать способ *НН* чрезвычайно чувствительным.

Возможности селекции электропроводящих предметов по постоянной времени переходного процесса при воздействии на объект прямоугольным импульсом магнитного поля рассмотрены в [3]. В этой работе используется метод переходных процессов и рассчитывается поток индукции через испытываемый объект. Здесь же обращено внимание на неустойчивость результатов вычитания экспоненциальных процессов. В нашей работе проводили записи распределений импульсных магнитных полей вблизи поверхности электропроводящих объектов на МН. Проведенные нами измерения с использованием гистерезисных свойств МН показали очень высокую точность контроля с прекрасной повторяемостью результатов при использовании одного и того же сформированного импульса с одним или несколькими выбросами. Оптические изображения полученных фигур сравнивали с оптическими изображениями эталонных объектов, по которым идентифицировали свойства контролируемого объекта. При этом над участками объекта с отличными свойствами параметры геометрических фигур $U(t)$ также отличаются от фигур для однородного бездефектного материала. Способ позволяет контролировать толщину и разнотолщинность объекта, параметры дефектов сплошности в нем, динамическую магнитную проницаемость μ , удельную электропроводность σ и ее распределение в объекте. Использование импульсов магнитного поля с одним или несколькими сформированными выбросами позволяет выделять полезную информацию при записи на МН, устранять записи фона или уменьшать их влияние, осуществлять перераспределение уровней записи магнитных полей и в конечном счете повышать точность контроля.

В качестве примера на рис. 14—17 показаны распределения сигнала $U(t)$, воспроизведенного индукционной МГ при сканировании ею сплошного МН с записями остаточных магнитных полей, полученными над пластиной из алюминия толщиной $1,7 \cdot 10^{-3}$ м с зубьями длиной $1,5 \cdot 10^{-2}$ м, шириной $1,3 \cdot 10^{-3}$ м и расстоянием между ними также $1,3 \cdot 10^{-3}$ м. На объект воздействовали импульсом магнитного поля с $t_{\max} = 6,5 \cdot 10^{-5}$ с без обратного выброса (рис. 14) и импульсом магнитного поля с другой амплитудой, таким же t_{\max} и одним обратным выбросом (рис. 15).

Из сравнения рис. 14 и 15 следует, что обратный выброс импульса магнитного поля при другой величине H источника позволил увеличить амплитуду электрического напряжения от зубьев пластины с $3 \cdot 10^{-3}$ В до $11 \cdot 10^{-3}$ В. При этом уровень фонового сигнала существенно уменьшился. Прокладка между листом из алюминия и пластиной с зубьями выполнена из оргстекла. Такой же

результат получается при использовании прокладки из другого немагнитного диэлектрика или в случае воздушной прослойки такой же толщины.

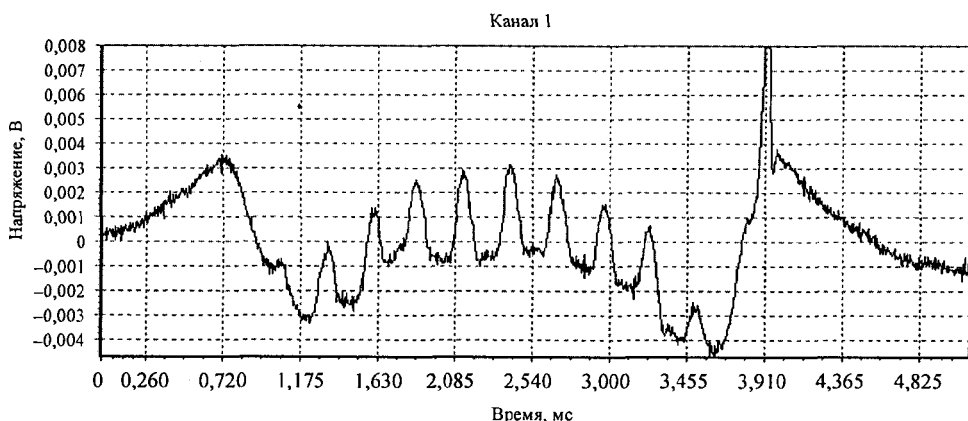


Рис. 14. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ:

запись над листом из алюминия толщиной $7,0 \cdot 10^{-5}$ м, под которым установлена прокладка из диэлектрика толщиной $8,0 \cdot 10^{-4}$ м, ниже расположена алюминиевая пластина с зубьями. Импульс поля без выброса.

Разработанные способы позволяют находить изображения зубьев указанной алюминиевой пластины под пластинами из алюминия (рис. 16) и свинца (рис. 17), а также под пластинами из других металлов.

Таким образом, применение пленочных датчиков магнитного поля с использованием их гистерезисных свойств позволяет контролировать свойства электропроводящих объектов на значительных площадях по-

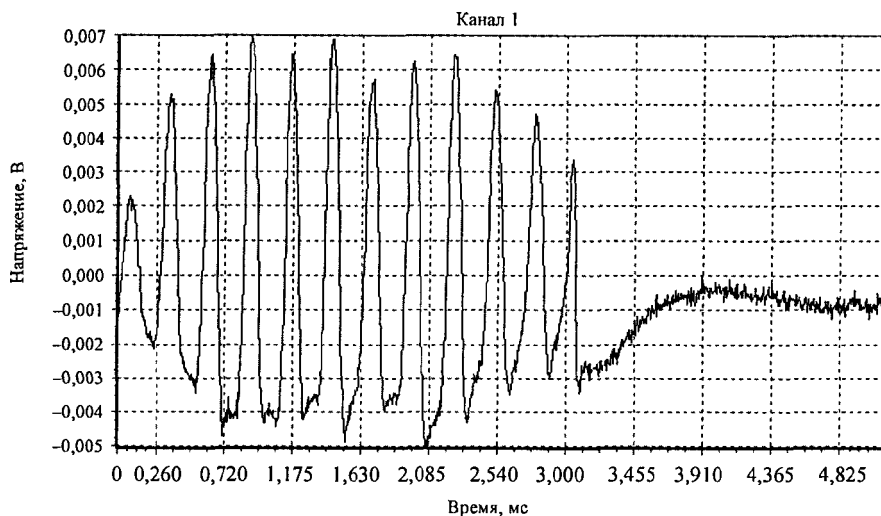


Рис. 15. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ:

запись над листом из алюминия толщиной $7,0 \cdot 10^{-4}$ м, под которым установлена прокладка из диэлектрика толщиной $8,0 \cdot 10^{-4}$ м, ниже расположена алюминиевая пластина с зубьями. Импульс поля с выбросом.

верхности с использованием одного кратковременного импульса магнитного поля.

Использование дискретного магнитного носителя позволяет значительно повысить точность контроля объектов. В данной работе использовали

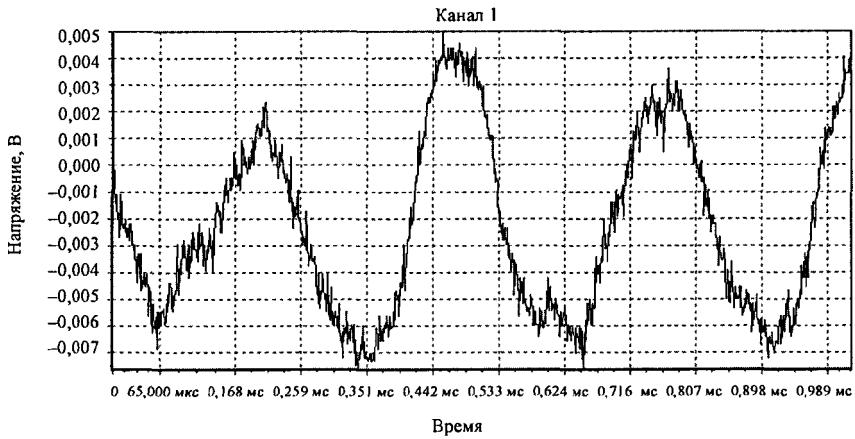


Рис. 16. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ:

запись над листом из алюминия толщиной $5,0 \cdot 10^{-4}$ м, под которым расположена алюминиевая пластина с зубьями. Импульс поля с выбросом.

ДДМП с шириной магнитных полос порядка долей миллиметра. Ширина таких полос может быть уменьшена вплоть до нескольких десятков атомных расстояний, а воспроизведение может осуществляться с помощью МГ или других считывающих устройств соответствующего размера.

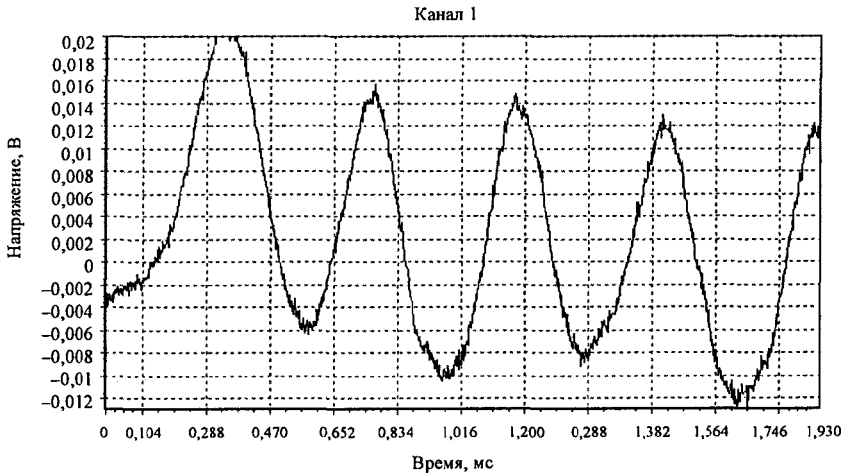


Рис. 17. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ:

запись над листом из алюминия толщиной $6,0 \cdot 10^{-4}$ м, под которым расположена алюминиевая пластина с зубьями. Импульс поля с выбросом.

ВЫВОДЫ

1. Исследовано явление гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля (HI), которое может быть осуществлено для любых магнитных материалов, обладающих гистерезисными свойствами.

2. Разработанные на основе HI способы могут быть использованы для контроля толщины электропроводящих объектов, определения их удельной

электропроводности σ и магнитной проницаемости μ , однородности распределения σ и μ , а также параметров дефектов сплошности в них.

Белорусский
национальный технический
университет
Минск

Поступила в редакцию
7 февраля 2011 г.;
в окончательном варианте
1 июня 2012 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов В.С., Смурага Л.Н., Павлюченко В.В. Опыт применения магнитографической дефектоскопии сварных стыковых соединений.— Дефектоскопия, 2009, № 8, с. 19—24.
 2. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях.— Дефектоскопия, 2010, № 11, с. 29—40.
 3. Реутов Ю.Я., Литвиненко А.А. О возможностях селекции электропроводящих предметов по постоянной времени переходного процесса при скачкообразном изменении намагничивающего поля.— Дефектоскопия, 1991, № 10, с. 80—87.
-