

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

Оптимизация параметров намагничивающего устройства электромагнитно-акустического преобразователя для контроля легированных сталей

В.А. Стрижак, А.В. Пряхин

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Республика Удмуртия, Россия

Поступила 04.03.2023

Принята к печати 14.06.2023

Бесконтактные электромагнитно-акустические преобразователи обладают набором значительных преимуществ по сравнению с контактными преобразователями, но при этом у них есть существенные недостатки, требующие разработки эффективных намагничивающих устройств. По сравнению с устройствами намагничивания на постоянных магнитах устройства намагничивания электрическим током легко снимаются с объекта контроля и очищаются от загрязнения металлическими частицами. К сожалению, такие преобразователи имеют значительные габариты и массу.

Разработан преобразователь, содержащий магнитопровод, намагничиваемый катушкой с электрическим током, и два независимых электромагнитных индуктора, расположенных в зазоре между центральной частью магнитопровода и объектом контроля. Индукторы представляют собой две плоские катушки, каждая из которых выполнена в виде бабочки. Проводники индукторов, расположенные в рабочей области, имеют взаимно перпендикулярные направления; с их помощью можно эффективно возбуждать и регистрировать поперечно поляризованные акустические волны без перестановки преобразователя. С целью уменьшения габаритных размеров и массы преобразователя произведена оптимизация массогабаритных параметров намагничивающего устройства для условий эксплуатации, когда намагничивание объекта контроля и измерения производятся во время активной фазы измерения. Во время пассивной фазы измерения, в три раза превышающей активную фазу по времени, происходит остывание намагничивающего устройства. Циклический режим с чередованием активной и пассивной фаз позволил уменьшить вес преобразователя более чем в 3 раза. В рабочей зоне преобразователя размером 15×15 мм при зазоре в 1 мм между концентратором магнитного поля и объектом контроля создаётся поле с нормальной компонентой в 2,4 Тл.

Преобразователь содержит защиту устройства намагничивания от перегрева, а циклический режим работы позволяет обеспечить непрерывную производительность до 30 измерений в минуту при температуре окружающей среды 20 °С.

Разработанное намагничивающее устройство может быть использовано при решении ряда задач структуроскопии, толщинометрии, дефектоскопии электромагнитно-акустическими методами, основанными на точном измерении времени распространения упругих волн в объекте контроля.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, электромагнитно-акустический преобразователь, намагничивающее устройство, моделирование

Адрес для переписки:

Стрижак В.А.
Ижевский государственный технический университет,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069,
Республика Удмуртия, Россия
e-mail: str@istu.ru

Address for correspondence:

Strizhak V.A.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069,
Udmurt Republic, Russia
e-mail: str@istu.ru

Для цитирования:

В.А. Стрижак, А.В. Пряхин.
Оптимизация параметров намагничивающего устройства электромагнитно-акустического преобразователя для контроля легированных сталей.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 2. – С. 81–95.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

For citation:

V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin.
[Optimization of the Parameters of the Magnetizing Device of the Electromagnetic-Acoustic Transducer].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 2, pp. 81–95 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

Optimization of the Parameters of the Magnetizing Device of the Electromagnetic-Acoustic Transducer

V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia

Received 04.03.2023

Accepted for publication 14.06.2023

Abstract

Contactless electromagnetic-acoustic transducers have a set of significant advantages over contact transducers, but at the same time they have significant disadvantages that require the development of effective magnetizing devices. Compared to magnetizing devices that are using permanent magnets, electric current magnetization devices are easily removed from the object of testing and cleaned from contamination by metal particles. Unfortunately, such transducers have significant dimensions and weight.

A transducer containing a magnetic circuit magnetized by an electric current coil and two independent electromagnetic inductors located in the gap between the central part of the magnetic circuit and the object of testing has been developed. Inductors are two flat coils, each of them has form like a butterfly. The inductor conductors located in the working area have mutually perpendicular directions; they allow exciting and receiving the transversely polarized acoustic waves without rearranging the transducer. In order to reduce the overall dimensions and mass of the transducer, the mass and dimensional parameters of the magnetizing device were optimized for operating conditions when the magnetization of the object of testing and measurement are performed during the active measurement phase. During the passive measurement phase, which is three times longer than the active phase in time, the magnetizing device cools down. The cyclic mode with alternating active and passive phases made it possible to reduce the weight of the transducer by more than 3 times. In the working area of the transducer with a size of 15×15 mm, with a gap of 1 mm between the magnetic field concentrator and the object of testing, a field with a normal component of 2.4 T is created.

The transducer has protection of the magnetization device from overheating, and the cyclic mode of operation allows for continuous performance of up to 30 measurements per minute at an ambient temperature of 20 °C.

The developed magnetizing device can be used in solving a number of problems of structuroscopy, thickness measurement, flaw detection by electromagnetic-acoustic methods based on accurate measurement of the propagation time of elastic waves in the object of testing.

Keywords: ultrasonic nondestructive testing, electromagnetic acoustic transducer, magnetizing system, modeling

Адрес для переписки:

Стрижак В.А.
Ижевский государственный технический университет,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069,
Республика Удмуртия, Россия
e-mail: str@istu.ru

Address for correspondence:

Strizhak V.A.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069,
Udmurt Republic, Russia
e-mail: str@istu.ru

Для цитирования:

В.А. Стрижак, А.В. Пряхин.
Оптимизация параметров намагничивающего устройства электромагнитно-акустического преобразователя для контроля легированных сталей.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 2. – С. 81–95.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

For citation:

V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin.
[Optimization of the Parameters of the Magnetizing Device of the Electromagnetic-Acoustic Transducer].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 2, pp. 81–95 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

Введение

Электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи применяются для решения широкого круга задач толщинометрии, структуроскопии и дефектоскопии [1–7]. Использование бесконтактных ЭМА преобразователей обусловлено рядом существенных эксплуатационных достоинств, в частности: возможностью контроля через воздушный зазор без применения контактных жидкостей; работой в условиях высоких температур; отсутствием износа ЭМА преобразователей; независимостью результатов контроля от перекосов преобразователей относительно поверхности объекта контроля и от наличия на поверхности ржавчины, окалины, краски, загрязнений; возможностью возбуждения и приёма нескольких частот упругих колебаний и разных типов волн, в том числе поперечных с горизонтальной поляризацией, которые трудно возбудить и принять контактным способом. К недостаткам ЭМА преобразователей необходимо отнести низкий коэффициент преобразования при излучении акустической волны и низкую чувствительность при приёме, а также значительные размеры, обусловленные необходимостью применения мощных намагничивающих устройств. Для увеличения эффективности ЭМА преобразователей на излучение и приём производят оптимизацию магнитных цепей и акустических полей, создаваемых преобразователем в объекте контроля [8–18]. Выделение полезного сигнала на фоне шумов реализуется за счёт усреднения большой серии измерений и разработкой специальных алгоритмов выделения полезной информации [19, 20].

Работа ЭМА преобразователя основана на преобразовании энергии электромагнитных колебаний в энергию упругих колебаний при излучении в объект контроля и преобразовании упругих колебаний в электромагнитные колебания при приёме.

При возбуждении и приёме ультразвуковых импульсов преимущественно используют магнитострикционный и электродинамический механизмы ЭМА преобразования. Магнитострикционный механизм основан на изменении размеров тела под действием магнитного поля, а электродинамический механизм использует

силу Лоренца, действующую на проводник с током в магнитном поле. Магнитострикционный механизм, как правило, требует создания тангенциальных магнитных полей в поверхностном слое объекта контроля и чаще всего используется для листовых материалов. Для массивных деталей наиболее предпочтительным является электро-динамический механизм ЭМА преобразования в виду относительно легко реализуемого нормального (ортогонального к поверхности объекта контроля) магнитного поля. При электродинамическом механизме повышение эффективности ЭМА преобразователей возможно за счёт повышения амплитуды возбуждающего импульса в индукторе, повышения чувствительности приёмного тракта и увеличения поля постоянного намагничивания в зоне возбуждения акустических импульсов [21–26].

Одной из важных задач структуроскопии является определение напряжённо-деформированного состояния крупных металлических объектов [27, 28]. Например, в ободьях железнодорожных вагонных колёс, производимых в соответствии с требованиями ГОСТ 10791-89 и ТУ 0943-157-01124328-2003, формируются остаточные напряжения, являющиеся следствием механических и физико-химических процессов при изготовлении (осадке, формовке, прокатке обода и последующей термической обработке). В процессе эксплуатации циклические нагрузки в области взаимодействия колеса и рельса создают чрезвычайно высокие давления, что при значительных внутренних остаточных напряжениях может приводить к появлению и быстрому развитию усталостных трещин даже при отсутствии явных металлургических дефектов. В связи с этим, нормативные документы РД 32-144-2000, СТО РЖД 1.11.002-2008, Европейский стандарт EN 13262-2004 предусматривают инструментальный контроль остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных колёс при их производстве и эксплуатации.

В соответствии с нормативными документами для цельнокатаных вагонных колёс диаметром 957 мм максимальное значение остаточных напряжений вблизи круга катания должно быть отрицательным (сжимающим) и не должно превышать значения 190 МПа

в окружном направлении на глубине 10 мм от поверхности катания колеса. При превышении указанной величины колесо не допускается к эксплуатации. Слой, на котором сжимающие напряжения переходят в растягивающие (переход через ноль), должен находиться на глубине не менее 40 мм от поверхности катания колеса. Последовательность проведения измерений и схема расположения ЭМА преобразователей по окружности и по толщине обода колеса предполагает установку датчика в 4-х точках на одно сечение обода при точности позиционирования по радиусу ± 1 мм. Локальность датчика обеспечивается конечным размером рабочей части индуктора. При толщине обода колеса около 74 мм размер рабочей зоны индуктора не должен превышать 15 мм [28–30].

Цель работы: оптимизировать массогабаритные параметры ЭМА преобразователя для целей контроля обода железнодорожного колеса.

Принцип работы электромагнитного акустического преобразователя

Измерение напряжённо-деформированного состояния производится по разности времени прихода двух акустических импульсов, имеющих разную поляризацию. При этом первый индуктор ориентирован так, чтобы колебания в волне были параллельны с вектором механических напряжений, а второй индуктор ориентирован перпендикулярно вектору механических напряжений. Рисунок 2 иллюстрирует механизм возбуждения поперечной волны индуктором с током i , расположенным в магнитном поле B . В объекте контроля индуцируются ток i_B , который под действием приложенного поля B вызывает смещение частиц в поверхностном слое. Смещения в объекте контроля, в соответствии с рисунком, направлены параллельно оси X . Для изменения поляризации волны необходимо повернуть индуктор с током на 90° вокруг оси Z . В этом случае смещения в объекте контроля будут направлены параллельно оси Y .

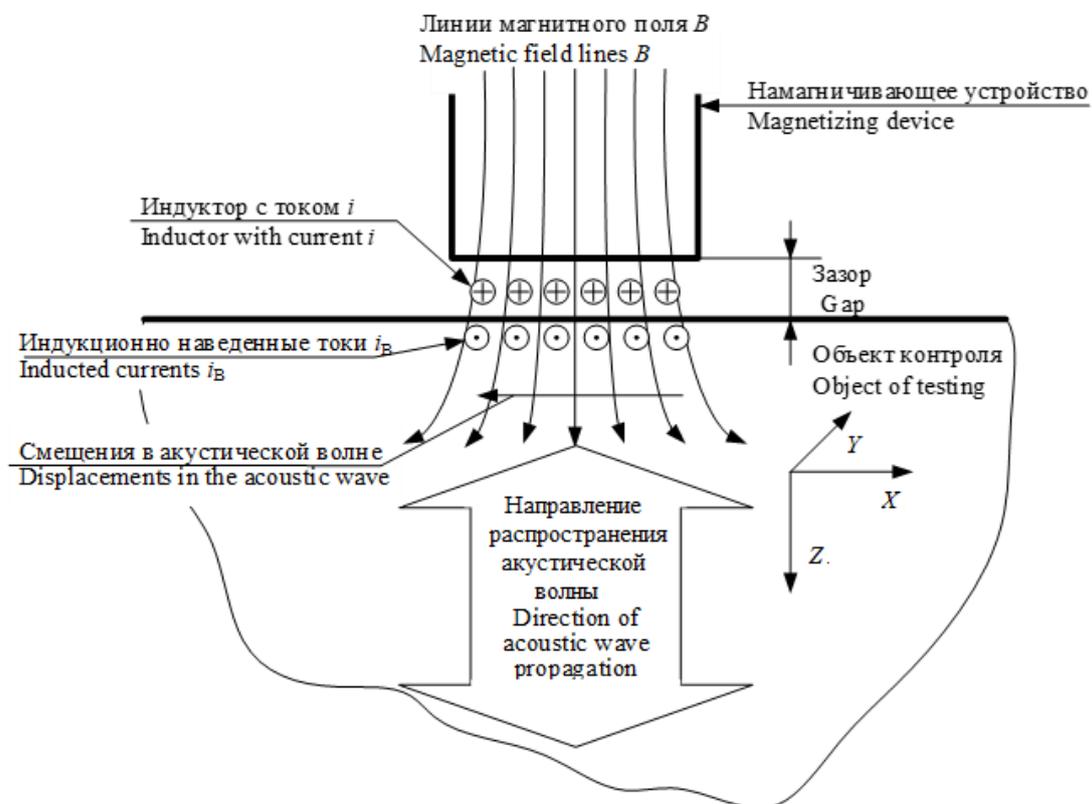


Рисунок 1 – Возбуждение и приём акустической волны ЭМА преобразователем

Figure 1 – Excitation and reception of an acoustic wave by an EMA transducer

Аналогичным образом реализуется приём акустических импульсов. Смещения в поверхностном слое образца в зоне с магнитным полем B создают токи под индуктором i_B .

Увеличение амплитуды сигнала ЭМА преобразователя возможно как при увеличении величины поля в зазоре по нормали к поверхности объекта контроля, так и при помощи увеличения амплитуды зондирующего импульса в катушке возбуждения. Наличие двух перпендикулярных друг другу индукторов позволяют создавать две поперечных волны с разной поляризацией.

Намагничивающее устройство

Известны конструкции намагничивающего устройства, основанные на использовании постоянных магнитов и электромагнитов, в том числе работающих в импульсном режиме [31, 33]. Недостатком устройства намагничивания на постоянных магнитах является необходимость приложения дополнительного усилия при установке и снятии преобразователя

с объекта контроля и трудности с очисткой рабочей поверхности преобразователя от загрязнения металлическими частицами. Преобразователь, содержащий устройство намагничивания током, лишен перечисленных недостатков. При выборе конструкции устройства намагничивания учтено, что приёмно-излучающие ЭМА индукторы, установленные в зазоре между объектом контроля и элементами магнитопровода, не должны подвергаться механическому воздействию. Например, устройство намагничивания в виде П-образной конструкции предполагает наличие двух опорных элементов, и индукторы ЭМА преобразователя расположены под рабочей опорой. Непосредственный контакт индуктора с объектом контроля будет приводить к быстрому разрушению индуктора. Конструкция магнитопровода, содержащая два опорных элемента по краям и концентратор магнитного поля в его центральной части (Ш-образная конструкция), лишены этого недостатка. Такая конструкция обеспечивает нормированный зазор в зоне индуктора, что повышает ресурс преобразователя.

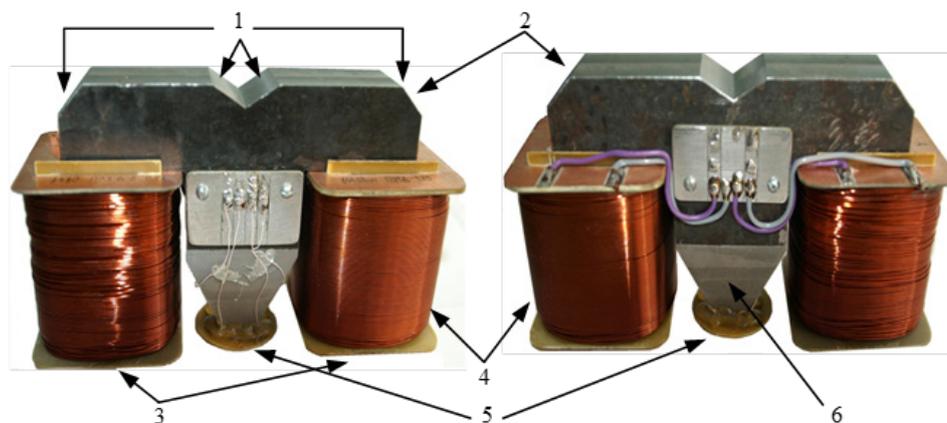


Рисунок 2 – Преобразователь с намагничивающими обмотками: 1 – акустические отражатели; 2 – магнитопровод; 3 – опорные элементы магнитопровода; 4 – катушка намагничивания; 5 – индуктор

Figure 2 – Transducer with magnetizing windings: 1 – acoustic reflectors; 2 – magnetic conductor; 3 – supporting elements of the magnetic conductor; 4 – magnetizing coil; 5 – inductor

Для решения поставленной задачи контроля разработано намагничивающее устройство на базе электромагнита с учётом регламентированного размера рабочей зоны для индуктора в виде квадрата со стороной 15 мм (рисунок 2). Изготовленный преобразователь содержит устройство намагничивания, представляющее собой Ш-образный магнитопровод

с двумя катушками, размещёнными на его опорных элементах. Магнитные поля, создаваемые в катушках намагничивания, направлены так, чтобы получить в рабочей зоне максимальную величину намагничивающего поля. Суммарное поле нормальной компоненты в рабочей зоне установки индуктора при зазоре в 1 мм достигает 2,4 Тл, что соответствует

области полей технического насыщения предполагаемого материала объекта контроля (например, Сталь 65 Г). Для исключения влияния паразитных акустических сигналов, возбуждаемых индуктором в теле магнитопровода, на тыльной стороне магнитопровода (напротив зоны расположения индуктора) нанесены отражающие грани, не влияющие на создаваемое в магнитопроводе поле. Количественные характеристики магнитного поля в зависимости от места размещения катушек намагничивания, размера и формы магнитопровода получены в программном комплексе для моделирования двумерных краевых задач методом конечных элементов Elcut 5.1. Измеренное поле в зазоре между концентратором магнитного поля и объектом контроля получено близким к расчётному значению. Недостатком экспериментального образца являлась большая масса (около 4,7 кг) и значительные габаритные размеры (185×100×65 мм).

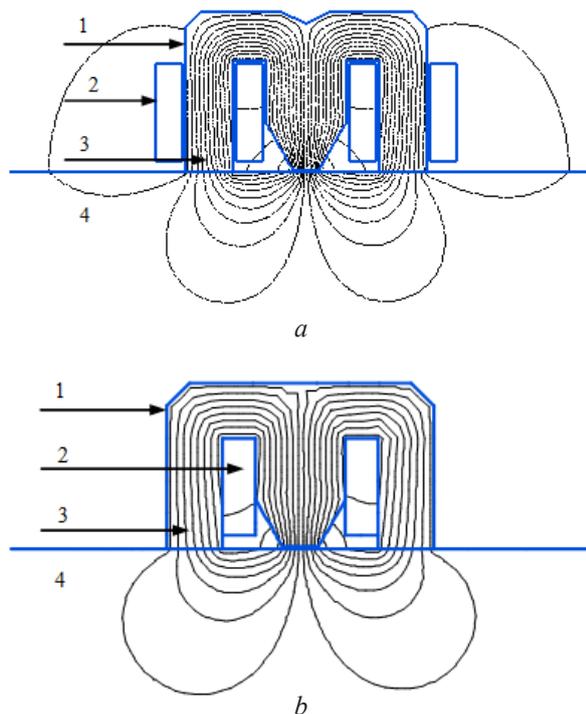


Рисунок 3 – Расположение намагничивающих обмоток: *a* – обмотка на опорных элементах; *b* – обмотка на центральном элементе магнитопровода; 1 – магнитопровод; 2 – намагничивающая обмотка; 3 – силовые линии поля; 4 – объект контроля

Figure 3 – Magnetizing winding arrangements: *a* – winding on the support elements; *b* – winding on the central element of the magnetic circuit; 1 – magnetic core; 2 – magnetizing winding; 3 – field lines; 4 – tested object

Для оценки влияния расположения намагничивающих обмоток на характеристики преобразователя произведено моделирование двух вариантов устройства, где магнитопровод выполнен из стали Ст20, а объект контроля задан в виде бесконечного полупространства из стали Ст3. Моделирование проводилось без изменения размеров магнитопровода и величины зазора. На рисунке 3 показано распределение линий магнитного поля в устройстве намагничивания с обмотками, установленными на опорных элементах магнитопровода (рисунок 3*a*), и с обмоткой, расположенной на центральном элементе магнитопровода (рисунок 3*b*). Наличие зазора в рабочей зоне магнитопровода и массивность объекта контроля вызывает перераспределение полей, приводящее к увеличению полей рассеивания вокруг опорных элементов магнитопровода и ослаблению величины поля в рабочей зоне (рисунок 3*a*). Размещение обмотки вокруг концентратора магнитного поля магнитопровода (рисунок 3*b*) позволяет уменьшить общую массу устройства на 15 % и уменьшить длину устройства с учётом обмоток на 30 мм.

Существенное уменьшение объёма намагничивающего устройства можно реализовать за счёт использования такого режима, при котором намагничивающее поле включается только на время проведения измерений (активная фаза измерения), а в остальное время магнитное поле выключено (пассивная фаза измерения). Проведение измерений с чередованием пассивной и активной фазы (циклический режим) позволяет увеличить плотность тока намагничивания I в обмотке. При этом в активной фазе измерения существенно возрастет выделяемое количество тепла, которое будет рассеиваться в пассивном режиме. Результаты моделирования устройства намагничивания при различных плотностях тока I в обмотке приведены на рисунках (рисунки 4, 5).

Моделирование проводилось путём изменения геометрических пропорций магнитопровода с фиксированной площадью окна намотки и толщине магнитопровода в 29 мм. Расчёт произведён для площади окна намотки $W = 520 \text{ мм}^2$ и $W = 780 \text{ мм}^2$. Обмотка выполнена проводом толщиной 0,49 мм, установлена на концентраторе магнитопровода и содержит соответственно 1500 или 2250 витков. В связи с прямой зависимостью общей массы

преобразователя от площади фронтальной поверхности результат расчёта поля в зазоре приведён относительно площади фронтальной поверхности магнитопровода S (рисунок 4) и

его объёма V (рисунок 5). При оценке объёма V намагничивающего устройства учитывается размер катушки намагничивания и её вынос за периметр магнитопровода.

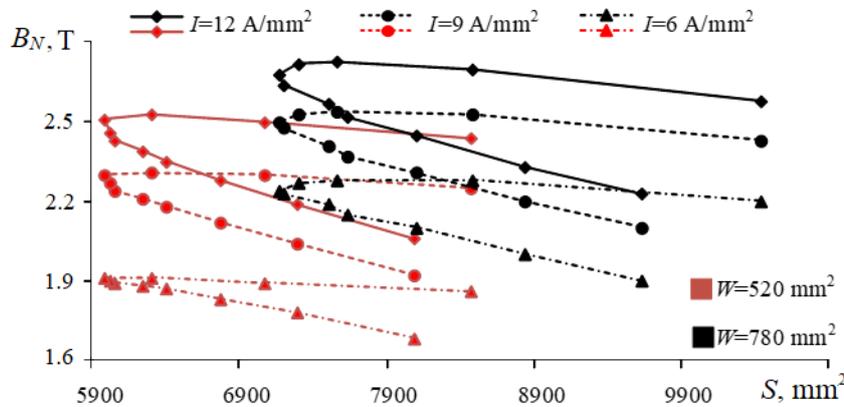


Рисунок 4 – Поле B_N в зазоре рабочей зоны при разной площади фронтальной поверхности магнитопровода S и различных токах намагничивания I

Figure 4 – Dependencies of magnetic field in gap B_N on the frontal area of magnetic core S for different magnetization modes

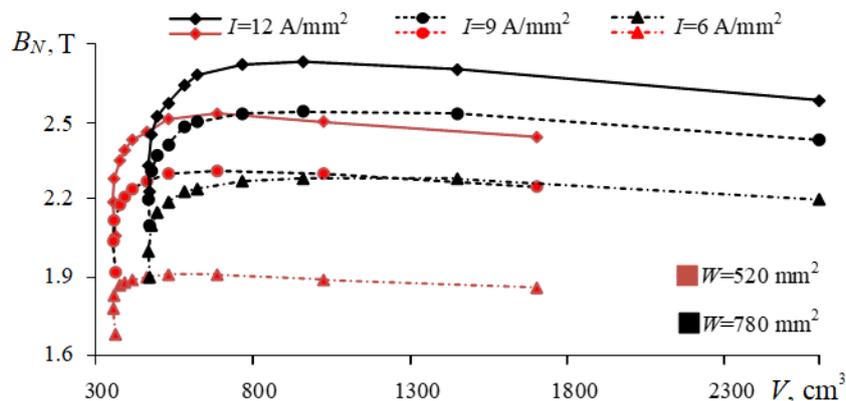


Рисунок 5 – Поле B_N в зазоре рабочей зоны при разных объёмах V и различных токах намагничивания I

Figure 5 – Field in gap B_N in dependence of magnetic core volume V in different magnetization modes

На рисунке 4 приведены зависимости величины поля B_N в зазоре рабочей зоны от площади фронтальной поверхности S . На зависимости величины поля B_N от объёма магнитопровода V можно выделить верхний горизонтальный и нижний вертикальный участок для каждого значения тока намагничивания I . Горизонтальный участок зависимости сформирован при увеличении длины магнитопровода, вертикальный участок зависимости получен при увеличении высоты магнитопровода. У слишком низкого магнитопровода или у слишком высокого магнитопровода снижение величины поля B_N

в зазоре рабочей зоны вызвано увеличением длины магнитной цепи. Так как в магнитную цепь также входит участок объекта контроля, представленный в расчёте бесконечным полупространством, то в силу существенного проигрыша сечения магнитопровода по сравнению с массивным объектом контроля, увеличение высоты магнитопровода приводит к более существенному увеличению магнитного сопротивления и, как следствие, падению величины поля B_N .

Для каждого тока намагничивания I в зависимости от площади фронтальной поверхности магнитопровода S наблюдается

экстремум, соответствующий минимальной фронтальной площади. Зона экстремума является оптимальной с точки зрения минимального размера магнитпровода при незначительном падении величины B_N относительно её максимального значения. Использование протяжённого магнитпровода упирается в резкий рост его объёма из-за всё более плоской катушки намагничивания (рисунок 5).

Увеличение площади окна намагничивающей обмотки с $W = 520 \text{ мм}^2$ до $W = 780 \text{ мм}^2$ приводит к росту B_n на 8,7 % и 6,8 % при плотности тока $I = 9 \text{ А/мм}^2$ и 12 А/мм^2 соответственно. При этом происходит рост площади S фронтальной поверхности магнитпровода на 20 % и объёма на 17 %. Использование больших размеров окон намагничивающей обмотки или рост плотности тока существенно ухудшает эксплуатационные свойства преобразователя в виду значительного роста подводимой мощности.

На основании результатов оптимизации размеров магнитпровода разработан и изготовлен преобразователь, предназначенный для циклического режима работы с чередованием активной и пассивной фаз измерения (пассивная фаза измерения по времени в три раза превышает активную фазу). Вес преобразователя составил 1,47 кг, при габаритных размерах $110 \times 55 \times 70 \text{ мм}$. Распределение магнитного поля в зазоре под концентратором электромагнита при различных величинах тока намагничивания показано на рисунках 6 и 7. Результаты получены с использованием магнитометра МФ-23ИМ.

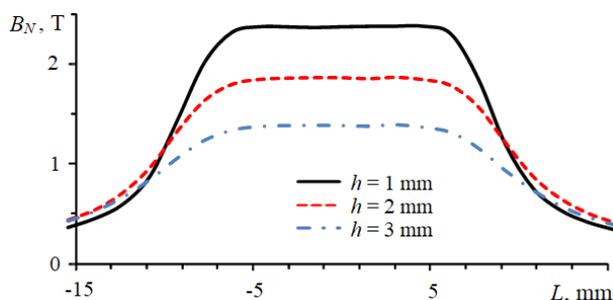


Рисунок 6 – Распределение нормальной составляющей магнитного поля B_N по продольной координате L электромагнита при различных размерах зазора h

Figure 6 – Distribution of the normal component of the magnetic field B_N along the longitudinal coordinate L of the electromagnet at different gap dimensions h

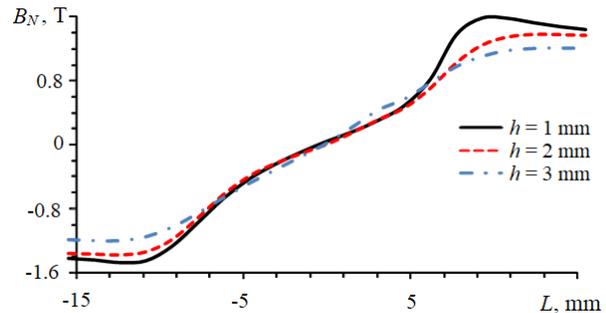


Рисунок 7 – Распределение тангенциальной составляющей магнитного поля B_T по продольной координате L электромагнита при различных размерах зазора h

Figure 7 – Distribution of the tangential component of the magnetic field B_T along the longitudinal coordinate L of the electromagnet at different gap dimensions h

Максимальное значение нормальной составляющей намагничивающего поля при зазоре в 1 мм составляет 2,4 Тл. Форма распределения магнитного поля не зависит от величины зазора, максимальная величина нормальной составляющей магнитного поля при росте величины зазора на 1 мм теряет 0,5 Тл. Расчётная рабочая зона электромагнита 15 мм, в основном, лежит в области равномерного распределения нормальной составляющей поля. Тангенциальная составляющая магнитного поля на краях рабочей зоны не превышает по модулю 0,8 Тл.

Приёмно-излучающая система преобразователя

Основные требования, выдвигаемые к приёмно-излучающей системе преобразователя – эффективность на излучение и чувствительность на приём. Дополнительное требование – технологичность изготовления. Область использования методики (измерение временных интервалов) требует от преобразователя излучения и приёма коротких импульсов с ярко выраженными фронтами (широкополосных импульсов).

В целях исключения необходимости перестановки преобразователя во время измерений, в преобразователе используются два независимых индуктора, имеющие взаимно перпендикулярные направления, работающие в совмещенном режиме. Это позволяет через электронную схему устройства переключаться между направлениями поляризации акустичес-

ких волн и отображать их в соответствующем измерительном канале. Размер зоны индуктора определяется заданной локальностью преобразователя. Индуктор реализован набором проводников с однонаправленным током, расположенных в рабочей зоне в виде «бабочки» (рисунок 8а). Размер рабочей зоны индуктора составляет квадрат со стороной 15 мм. Центральная частота возбуждающих импульсов 2,5 МГц.

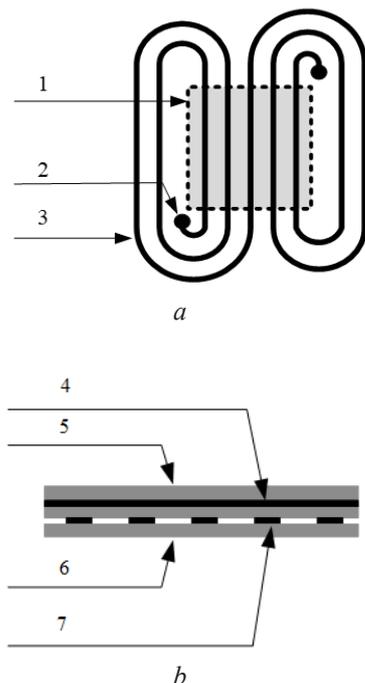


Рисунок 8 – Индуктор: *a* – топология индуктора «бабочка»; *b* – индуктор в разрезе; 1 – рабочая зона; 2 – контакт; 3 – проводники; 4 – проводник с током 1; 5 – изолятор; 6 – протектор; 7 – проводник с током 2

Figure 8 – An inductor: *a* – butterfly inductor topology; *b* – sectional view of an inductor; 1 – working area; 2 – contact; 3 – conductors; 4 – conductor with current 1; 5 – insulator; 6 – protector; 7 – conductor with current 2

Требования к индуктору, работающему на излучение: низкое реактивное сопротивление и устойчивость к значительным импульсным токам (более 50 А). Требования к индуктору, работающему на приём: согласованность с трактом усиления и устойчивость к значительным импульсным напряжениям (более 1000 В). Выбор количества витков индуктора излучения определяется возможностями электронной аппаратуры. На частоте 2,5 МГц современное состояние электронной базы позволяет получить ударные импульсы разма-

хом до 2,5 кВ. Условия диэлектрической прочности индуктора на межвитковый пробой и условия согласования с электронным трактом генератора позволили достичь в импульсе значения 700 Ампер-витков. При этом индуктор хорошо согласуется с приёмным трактом, реактивное сопротивление индуктора на частоте 2,5 МГц составило около 60 Ом при индуктивности 4 мкГн.

В собранном виде два индуктора с набором изоляционных слоёв выглядят, как слоёная конструкция, содержащая протектор для защиты индуктора со стороны объекта контроля, 1-й индуктор, изолятор, 2-й индуктор, изолятор индуктора от магнитопровода (рисунок 8б). Индукторы изготовлены из двустороннего фольгированного стеклотекстолита СФ2-0,3-35Г фоторезистивным способом. Трассировка выполнена в форме «бабочки», число витков каждой плоской катушки равно 20, расстояние проводник – зазор 0,4–0,3 мм. Разные фрагменты конструкции склеены между собой и имеют общую толщину в 1 мм.

Внешний вид преобразователя представлен на рисунке 9.

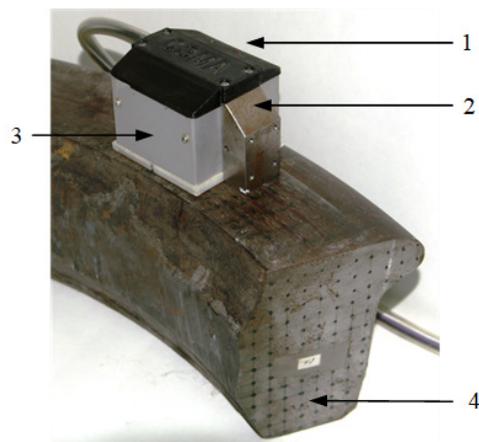


Рисунок 9 – Преобразователь в собранном виде установлен на фрагменте обода колеса: 1 – крышка с индикаторами режима работы; 2 – магнитопровод с акустическим отражателем и отверстиями для установки преобразователя в узел перемещения; 3 – катушка намагничивания в защитном кожухе; 4 – фрагмент обода железнодорожного колеса

Figure 9 – Fully assembled transducer mounted on a piece of wheel rim: 1 – cover with operating mode indicators; 2 – magnetic conductor with acoustic reflector and holes for installing the converter in the displacement unit; 3 – magnetization coil in a protective casing; 4 – fragment of the rim of a railway wheel

В верхней части преобразователя, под крышкой, расположена схема электронной защиты от перегрева с индикатором наличия тока намагничивания и индикатором включения защиты. На внешних торцах магнитопровода размещены отверстия для установки преобразователя в узлы перемещения или позиционирования.

Схема защиты настроена на превышение отметки 60 °С, после чего цепь тока намагничивания принудительно размыкается, что предотвращает возникновение перегрева. Эксплуатация преобразователя реализована на структуроскопе электромагнитно-акустическом СЭМА (номер в госреестре утверждённых типов средств измерений – 61957-15), с использованием программного обеспечения «Принц VIII» (свидетельство о государственной регистрации программы

для ЭВМ – RU 2015662211). Программное обеспечение реализует процедуру измерения с усреднением в пакетном и непрерывном режиме [34]. Внешний вид интерфейса программы и вид зарегистрированного сигнала показан на рисунке 10. По нажатию кнопки «Старт» производится включение устройства намагничивания и после паузы в 0,4 с результаты измерений последовательно накапливаются для каждого индуктора. Пауза необходима для завершения процесса установления магнитной цепи. После окончания измерений поле отключается. Для отстройки от шумов использовано усреднение многократных измерений, типовая настройка – 64. Полный цикл измерений с учётом усреднения составляет 0,5 с с последующим интервалом охлаждения за 1,5 с, и используется для установки преобразователя в новое положение.

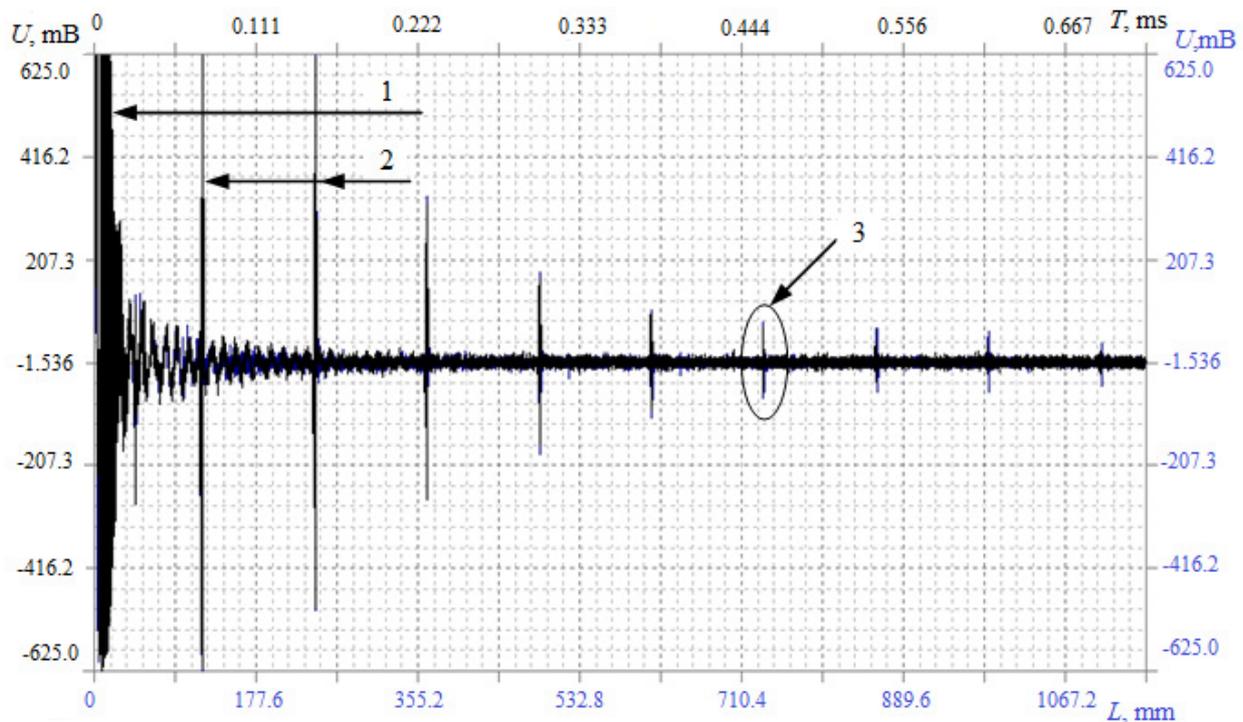


Рисунок 10 – Вид зарегистрированного сигнала в программе «Принц VIII»: 1 – зондирующий импульс; 2 – 1-й и 2-й донный импульс в ограничении; 3 – 6-й донный импульс

Figure 10 – A view of signals registered in the Prince VIII software: 1 – probing pulse; 2 – 1st and 2nd bottom pulses in limitation; 3 – 6th bottom pulse

В рабочем поле программы «Принц VIII» (рисунок 10) представлена эхограмма многократных отражений, полученная при прозвучивании обода толщиной 0,13 м поперечными волнами с взаимно-перпендикуляр-

ной поляризацией. На верхней шкале отображается время, а на нижней – расстояние, пройденное акустическим импульсом с учётом введённой в программу скорости ультразвука.

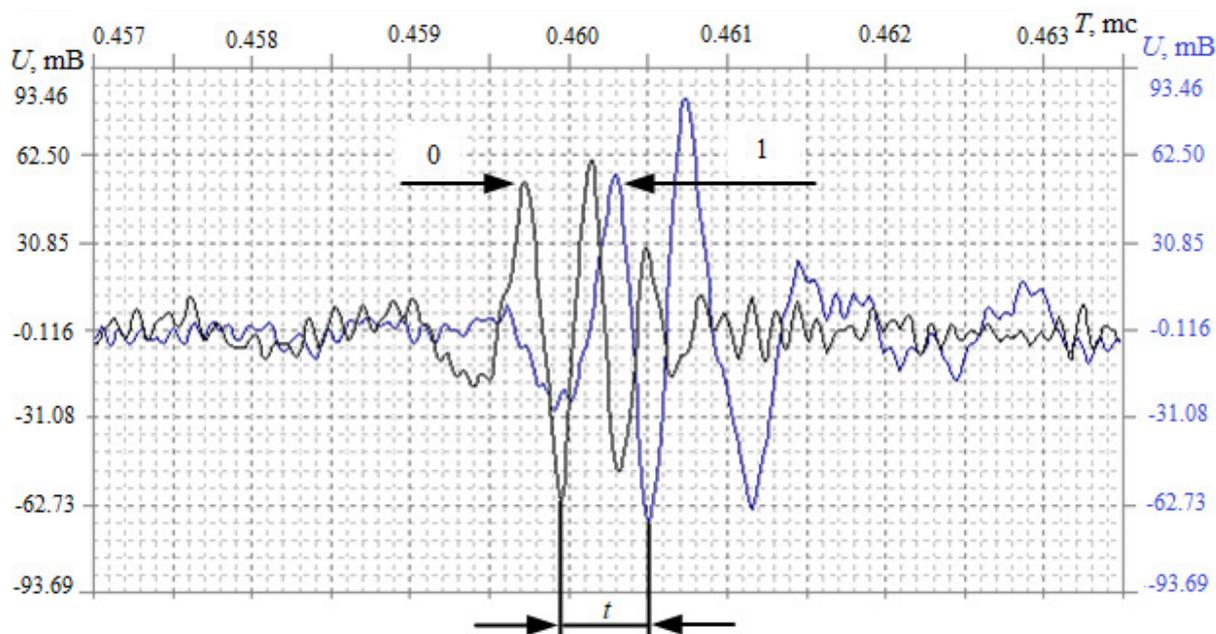


Рисунок 11 – Вид сигналов на 6-м отражении: 0 – Звено 0; 1 – Звено 1

Figure 11 – A view of signals with magnification at 6th reflection: 0 – Link 0; 1 – Link 1

Подробный вид зарегистрированных сигналов в зоне 6-го отражения показан на рисунке 11. Разность времени прихода между импульсами t позволяет рассчитать величину напряжённо деформированного состояния объекта контроля в зоне установки датчика [30]. Частота дискретизации измерительного канала составляет 100 МГц. Для точного расчёта временного интервала t производится интерполяция промежуточных точек с целью повышения частоты дискретизации до 1 ГГц. Значение временного интервала t получено поиском максимума функции взаимной корреляции импульса в звене 0 и импульса в звене 1 [35].

Заключение

Разработан преобразователь с электрическим намагничиванием, содержащий 2 независимых ЭМА индуктора в виде бабочки, эффективно излучающих и принимающих акустические импульсы двух поперечных волн с взаимно перпендикулярной поляризацией. Индукторы расположены в зазоре между центральной частью магнитопровода и объектом контроля и позволяют без перестановки преобразователя возбуждать и регистрировать в объекте контроля поперечно поляризованные

акустические импульсы. С целью уменьшения габаритных размеров и массы преобразователя произведена оптимизация устройства намагничивания для условий эксплуатации с чередованием активной и пассивной фаз измерения, где пассивная фаза по времени в три раза превышает активную фазу. Это позволило уменьшить вес преобразователя в более чем 3 раза, значительно уменьшив его габаритные размеры. В рабочей зоне преобразователя размером 15×15 мм при зазоре в 1 мм между концентратором магнитного поля и объектом контроля создаётся нормальное поле в 2,4 Тл. Преобразователь содержит защиту устройства намагничивания от перегрева, а циклический режим работы позволяет обеспечить непрерывную производительность до 30 измерений в минуту при температуре окружающей среды 20 °С. Нагрев преобразователя происходит только во время проведения измерений. В момент переустановки преобразователя устройство намагничивания остывает.

Разработанное намагничивающее устройство может быть использовано при решении ряда задач структуроскопии, толщинометрии, дефектоскопии ЭМА методами, основанными на точном измерении времени распространения упругих волн в объекте контроля.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>

Список использованных источников

1. Hiraio M., Ogi H. Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements Using EMATs. Tokyo: Springer Japan. – 2017. – 380 p.

DOI: 10.1007/978-4-431-56036-4

2. Lü J., Liu G. Magneto-Acousto-Electrical NDT and Improved EMD De-Noising Algorithm. Transactions of Chinese Electrotechnical Society. – 2018. – Vol. 33. – No. 17. – Pp. 3935–3942.

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171126

3. Pei C., Zhao S., Liu T., Chen Z. A new method for plastic strain measurement with Rayleigh wave polarization. Ultrasonics. – 2018. – Vol. 88. – Pp. 168–173.

DOI: 10.1016/j.ultras.2018.04.004

4. Xie S., Tian M., Xiao P., Pei C., Chen Z., Takagi T. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection. NDT & E International. – 2017. – Vol. 86. – Pp. 153–163. **DOI:** 10.1016/j.ndteint.2016.12.006

5. Баширов М.Г. Электромагнитно-акустический метод оценки технического состояния энергетического оборудования / М.Г. Баширов [и др.] // Промышленная энергетика. – 2016. – № 12. – С. 8–13.

6. Муравьев В.В. Прибор для исследований акустоупругих характеристик тонких проволок / В.В. Муравьев, Д.В. Злобин, А.В. Платунов // Изв. высш. уч. заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 572–577.

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-572-577

7. Козлов А.В. Области применения и основные типы преобразователей с сухим точечным контактом в ультразвуковом контроле / А.В. Козлов // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 10. – С. 4–18.

DOI: 10.14489/td.2018.10.pp.004-018

8. Муравьев В.В. Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, Л.В. Волкова // Сталь. – 2016. – № 10. – С. 75–79.

9. Isla J., Cegla F. EMAT phased array: A feasibility study of surface crack detection. Ultrasonics. – 2017. –

Vol. 78. – Pp. 1–9.

DOI: 10.1016/j.ultras.2017.02.009

10. Muraveva O.V., Muravev V.V., Myshkin Yu.V. Laws of formation of grating lobes in the acoustic field of electromagnetic-acoustic transducers as a linear array of unidirectional conductors. NDT & E International. – 2018. – Vol. 93. – Pp. 40–56.

DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.09.009

11. Plesnetsov S.Yu. [et al.] Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2. Technical Electrodynamics. – 2018. – No 1. – Pp. 30–36. **DOI:** 10.15407/technd.2018.01.030

12. Ren W., He J., Dixon S., Xu K. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate. Sensors and Actuators A: Physical. 2018. – Vol. 274. – Pp. 189–198. **DOI:** 10.1016/j.sna.2018.03.010

13. Rieger K., Erni D., Rueter D. Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs. NDT & E International. – 2022. – Vol. 125. – Pp. 102569.

DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102569

14. Базылев Д.Н. Ультразвуковой контроль металлоконструкций с использованием фазированной электромагнитно-акустической антенной решетки / Д.Н. Базылев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 12. – С. 1060–1066. **DOI:** 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1060-1066

15. Комаров В.А. Магнитоупругое электромагнитно-акустическое преобразование. Часть 7. Двойное преобразование при эффекте Видемана / В.А. Комаров // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23. – № 10(268). – С. 30–39.

DOI: 10.14489/td.2020.10.pp.030-039

16. Толипов Х.Б. Возможности повышения эффективности бесконтактного излучателя акустических волн / Х.Б. Толипов // Дефектоскопия. 2017. – № 4. – С. 71–74.

17. Ашихин Д.С. Исследование влияния параметров электромагнитно-акустического преобразователя на точность измерения толщины изделий / Д.С. Ашихин, А.В. Федоров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 376–384.

DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-376-384

18. Петров К.В. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов / К.В. Петров // Дефектоскопия. – 2019. – № 2. – С. 16–24. **DOI:** 10.1134/S0130308219020027

19. Петров К.В. Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов / К.В. Петров, М.Ю. Соков, О.В. Муравьева // Вестник ИжГТУ

имени М.Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 135–146. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146

20. Алешин Н.П. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем / Н.П. Алешин [и др.] // Дефектоскопия. – 2021. – № 5. – С. 22–30.

DOI: 10.31857/S0130308221050031

21. Гобов Ю.Л. Намагничивающая система для ЭМА-сканера-дефектоскопа / Ю.Л. Гобов, А.В. Михайлов, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 48–56.

22. Сучков Г.М. Портативный накладной прямой совмещенный электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвукового контроля через диэлектрические слои толщиной до 20 мм на поверхности ферромагнитных металлоизделий / Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек // Дефектоскопия. – 2022. – № 5. – С. 13–23.

DOI: 10.31857/S0130308222050025

23. Сучков Г.М. Бесконтактный спектральный экспресс-способ обнаружения коррозионных повреждений металлоизделий / Г.М. Сучков [и др.] // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 14–21.

DOI: 10.31857/S0130308220010029

24. Сучков Г.М. Мощные источники питания высокочастотных преобразователей электромагнитного типа для измерений, контроля и диагностики / Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, С.Ю. Плеснецов // Дефектоскопия. – 2017. – № 12. – С. 35–39.

25. Сучков Г.М. Генератор зондирующих импульсов для ЭМА-дефектоскопов / Г.М. Сучков [и др.] // Дефектоскопия. – 2012. – № 9. – С. 42–47.

26. Чабанов В.Е. Расчет и проектирование электромагнитно-акустических преобразователей для ультразвукового неразрушающего контроля / В.Е. Чабанов, В.А. Жуков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2014. – № 3(201). – С. 57–73.

27. Муравьев В.В. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В.В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 12–20.

28. Муравьев В.В. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении / В.В. Муравьев, К.А. Тапков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8. – № 3. – С. 263–270. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270

29. Муравьев В.В. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-

акустическим методом / В.В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 8. – С. 16–28.

30. Муравьев В.В. Исследование двухосного напряженного состояния в рельсах Р65 методом акустоупругости / В.В. Муравьев [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – Т. 17. – № 1. – С. 19–25.

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-1-19-25

31. Муравьев В.В. К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя / В.В. Муравьев, В.А. Стрижак, Е.Н. Балобанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1(17). – С. 197–205.

32. Самокрутов А.А. Моделирование магнитных систем ЭМАП для возбуждения ультразвуковых волн в упругом слое в постоянном и импульсном магнитных полях / А.А. Самокрутов // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 12. – С. 22–27.

DOI: 10.14489/td.2014.12.pp.022-027

33. Злобин Д.В. Влияние динамического подмагничивания на эффективность электромагнитно-акустического преобразования при волноводном контроле прутков / Д.В. Злобин, Л.В. Волкова // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8. – № 3. – С. 236–245.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

34. Стрижак В.А. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В.А. Стрижак [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1(17). – С. 243–250.

35. Стрижак В.А. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В.А. Стрижак [и др.] // Изв. высш. уч. заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 565–571.

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571

References

1. Hirao M., Ogi H. Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements Using EMATs. Tokyo: Springer Japan, 2017, 380 p.

DOI: 10.1007/978-4-431-56036-4

2. Lü J., Liu G. Magneto-Acousto-Electrical NDT and Improved EMD De-Noising Algorithm. *Transactions of Chinese Electrotechnical Society*, 2018, vol. 33, no. 17, pp. 3935–3942. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171126

3. Pei C., Zhao S., Liu T., Chen Z. A new method for plastic strain measurement with Rayleigh wave polarization. *Ultrasonics*, 2018, vol. 88, pp. 168–173.

DOI: 10.1016/j.ultras.2018.04.004

4. Xie S., Tian M., Xiao P., Pei C., Chen Z., Takagi T. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection. *NDT & E International*, 2017, vol. 86, pp. 153–163. DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.12.006
5. Bashirov M.G., Khusnutdinova I.G., Khusnutdinova L.G., Usmanov D.R. Electromagnetic-acoustic method of technical state assessment of power equipment. *Industrial Energy*, 2016, no. 12, pp. 8–13.
6. Muraviev V.V., Zlobin D.V., Platonov A.V. Device for studies on acoustic-elastic characteristics of thin wires. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 572–577. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-572-577
7. Kozlov A.V., Pichugin N.K., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Fields of application and principle types of transducers with dry point contact in ultrasonic non-destructive testing. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 10, pp. 4–18. DOI: 10.14489/td.2018.10.pp.004-018
8. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 10, pp. 752–756. DOI: 10.3103/S0967091216100077
9. Isla J., Cegla F. EMAT phased array: A feasibility study of surface crack detection. *Ultrasonics*, 2017, vol. 78, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.02.009
10. Muraveva O.V., Muravev V.V., Myshkin Yu.V. Laws of formation of grating lobes in the acoustic field of electromagnetic-acoustic transducers as a linear array of unidirectional conductors. *NDT & E International*, 2018, vol. 93, pp. 40–56. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.09.009
11. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 1, pp. 30–36. DOI: 10.15407/techned2018.01.030
12. Ren W., He J., Dixon S., Xu K. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, vol. 274, pp. 189–198. DOI: 10.1016/j.sna.2018.03.010
13. Rieger K., Erni D., Rueter D. Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs. *NDT & E International*, 2022, vol. 125, pp. 102569. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102569
14. Bazylev D.N., Romanovich V.A., Somov S.N., Pyrkin A.A. Ultrasonic inspection of metal structures using phased electromagnetic-acoustic antenna array. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol. 61, no. 12, pp. 1060–1066. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1060-1066
15. Komarov V.A. Magneto-elastic electromagnetic-acoustic conversion. Part 7. Double conversion with Wideman effect. *Kontrol'. Diagnostika*, 2020, vol. 23, no. 10(268), pp. 30–39. DOI: 10.14489/td.2020.10.pp.030-039
16. Tolipov K.B. Possibilities for increasing the efficiency of contactless emitters of acoustic waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 304–307. DOI: 10.1134/S106183091704009X
17. Ashikhin D.S., Fedorov A.V. Influence investigation of electromagnetic-acoustic transducer parameters on thickness measurement accuracy by numerical modeling methods. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 376–384. DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-376-384
18. Petrov K.V., Murav'eva O.V., Myshkin Y.V., Basharova A.F. Modeling magnetic, electric, and acoustic fields of a pass-through transducer when testing cylindrical objects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 102–110. DOI: 10.1134/S1061830919020062
19. Petrov K.V., Sokov M.Y., Muravieva O.V. The Effect of Electromagnetic Acoustic Transducer Design Features on Results of Cylinder Object Testing. *Vestnik IkhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 135–146. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146
20. Aleshin N.P., Krysko N.V., Kusyy A.G., Skrynnikov S.V., Mogilner L.Y. Investigating the detectability of surface volumetric defects in ultrasonic testing with the use of rayleigh waves generated by an electromagnetic-acoustic transducer. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 361–368. DOI: 10.1134/S1061830921050028
21. Gobov Y.L., Mikhailov A.V., Smorodinskii Y.G. A magnetizing system for an ema scanner-flaw detector. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 11, pp. 659–666. DOI: 10.1134/S1061830914110035
22. Suchkov G.M., Mygushchenko R.P., Kropachek O.Yu. A portable straight beam combined electromagnetic-acoustic transducer for ultrasonic testing through dielectric layers up to 20 mm thick on the surface of ferromagnetic metal products. *Defectoscopy*, 2022, no. 5, pp. 13–23. DOI: 10.31857/S0130308222050025
23. Suchkov G.M., Migushchenko R.P., Kropachek O.Y., Plesnetsov S.Y., Bilyk Z.V., Boussi S., Horoshailo Y.E., Efimenko S.A. Noncontact spectral express method for detecting corrosion damage to metal products. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 12–19. DOI: 10.1134/S1061830920010118
24. Suchkov G.M., Mygushchenko R.P., Plesnetsov S.Y. Powerful sources for high frequency electromagnetic transducers for measurement, monitoring and diagnostics. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 12, pp. 850–855. DOI: 10.1134/S1061830917120063

25. Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Cherednichenko I.V., Fedorov V.V., Desyatnichenko A.V., Khashchina S.V., Maslova M.S. A generator of probing pulses for emat flaw detectors. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, no. 9, pp. 537–540.
DOI: 10.1134/S1061830912090082
26. Chabanov V.E., Zhukov V.A. Calculation and design of emat for ultra-sonic nondestructive testing. *ST. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and mathematics*, 2014, no. 3(201), pp. 57–73.
27. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Kulikov V.A. An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 7, pp. 370–376.
28. Murav'ev V.V., Tapkov K.A. Evaluation of strain-stress state of the rails in the production. *Devices and methods of measurements*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 263–270.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270
29. Muravyev V.V., Muravyeva O.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Balobanov E.N., Volkova L.V. Evaluation of residual stresses in rims of wagon wheels using the electromagnetic-acoustic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, no. 8, pp. 512–521.
DOI: 10.1134/S1061830911080079
30. Murav'ev V.V., Yakimov A.V., Volkova L.V., Platunov A.V. Investigation of biaxial stress state in R65 rails by acoustoelasticity method. *Intellekt. Sist. Proizv.*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 19–25.
DOI: 10.22213/2410-9304-2019-1-19-25
31. Muraviev V.V., Strizhak V.A., Balobanov E.N. On Parameters Calculation of Electromagnetic-Acoustic Transducer Magnetic System. *Intellekt. Sist. Proizv.*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 197–205.
32. Samokrutov A.A., Alyokhin S.G., Shevaldykin V.G., Bobrov V.T., Bobrov S.V. Simulation of magnetic field for emat ultrasonic waves in an elastic layer in a continuous and pulsed magnetic fields. *Kontrol'. Diagnostika*, 2014, no. 12, pp. 22–27.
DOI: 10.14489/td.2014.12.pp.022-027
33. Zlobin D.V., Volkova L.V. Influence of dynamic magnetization to improve the efficiency of electromagnetic-acoustic transformation with waveguide control rods. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 236–245.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245
34. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Obukhov S.A., Efremov A.B. The information and measuring system for excitation, detection, registration and processing of signals from electromagnetic-acoustic transducers. *Intellekt. Sist. Proizv.*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 243–250.
35. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Khasanov R.R., Efremov A.B. Hardware-software complex for rods control by mirror-shadow method using multiple reflections. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 565–571. **DOI:** 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571