

УДК 621.314.14

Влияние динамического подмагничивания на эффективность электромагнитно-акустического преобразования при волноводном контроле прутков

Злобин Д.В., Волкова Л.В.

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

Поступила 15.05.2017

Принята к печати 20.06.2017

Недостатком электромагнитно-акустического (ЭМА) метода приема ультразвуковых колебаний является его низкая эффективность. Традиционные способы ее повышения – увеличение подмагничивающего поля. Целью данной работы являлось исследование способа повышения эффективности ЭМА преобразования с использованием изменяющегося во времени поля подмагничивания.

Исследования проводились с помощью специально разработанной установки, позволяющей осуществлять подмагничивание постоянным и переменным магнитным полем (динамическое подмагничивание) синхронно с прохождением принятого импульса. Объектом исследования являлись прутки из различных марок стали диаметром 4–6 мм, в которых ЭМА методом возбуждалась симметричная нулевая мода S_0 стержневой волны (в частотном диапазоне около 40 кГц). Проведен сравнительный анализ амплитуд и форм серии импульсов многократных отражений при статическом и динамическом перемагничивании и с полным циклом перемагничивания.

В результате проведенных измерений эффективности ЭМА приема при статическом и динамическом подмагничивании установлено существенное (до 5 раз) увеличение амплитуды сигнала на приемном преобразователе. В связи с тем, что на низких частотах основной вклад в механизм как возбуждения, так и приема вносит магнитострикционный эффект, можно предполагать, что использование динамического поля подмагничивания существенным образом влияет на эффективную подвижность магнитных доменов (т.е. изменяет динамическую магнитную восприимчивость материала). Установлена возможность проводить контроль при меньших значениях подмагничивающего поля, а следовательно, снизить массогабаритные размеры магнитной системы.

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлено наличие и произведена оценка величины эффекта динамического подмагничивания (увеличение амплитуды сигнала принятого ЭМА методом акустического импульса). Использование данного метода позволит повысить качество ЭМА контроля за счет создания более эффективных ЭМА преобразователей. Поскольку величина обнаруженного эффекта существенно зависит от марки стали, можно предположить его возможное применение в методах экспресс-анализа, оценки структурного и напряженного состояний.

Ключевые слова: линейно-протяженные объекты, волноводный контроль, эффективность электромагнитно-акустического преобразования, динамическое подмагничивание, катушка подмагничивания.

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

Адрес для переписки:

Волкова Л.В.

Ижевский государственный технический
университет им. М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Address for correspondence:

Volkova L.V.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Для цитирования:

Злобин Д.В., Волкова Л.В.

Влияние динамического подмагничивания на эффективность
электромагнитно-акустического преобразования при волноводном
контроле прутков.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 236–245.

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

For citation:

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 (in Russian).

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

Influence of Dynamic Magnetization to Improve the Efficiency of Electromagnetic-Acoustic Transformation with Waveguide Control Rods

Zlobin D.V., Volkova L.V.

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

Received 15.05.2017

Accepted for publication 20.06.2017

Abstract

The disadvantage of the electromagnetic-acoustic (EMA) method receiving ultrasonic waves are low efficiency. The traditional way to enhance its effectiveness is increase the bias field. The aim of the study was research the way to improve the efficiency of the EMA transformation, using a time-varying bias field.

The researches held with the help of a specially designed installation that allows the magnetization to be performed by a constant and alternating magnetic field (dynamic bias), synchronously with the passage of the received pulse. The object of the study were rods made of different grades of steel with a diameter of 4–6 mm, in which the symmetrical zero mode S_0 of the rod wave was excited by the EMA method (in the frequency range of about 40 kHz). A comparative analysis of the amplitudes and form pulses of multiple reflections during static and dynamic reversal of magnetization and with a full cycle of magnetization reversal conducted.

The result of the efficiency measurements EMA reception during static and dynamic bias found a significant (up to 5 times) increase in the signal amplitude on the receiving transducer. Taking into account that the main contribution to the excitation mechanism and the reception mechanism made the magnetostrictive effect on low frequency, it can be assumed that using a dynamic bias field is impacting significant on the effective mobility of magnetic domains (that is changes the dynamic magnetic susceptibility of the material). It is established that it is possible to monitor steel at lower values of the bias field, and, consequently, to reduce the mass dimensions of the magnetic system.

Thus, in the course of the researchers found of effect of dynamic bias and effect of dynamic bias increase acoustic pulse amplitude of the signal of the received EMA method. Using this method will improve the quality EMA testing by creating more efficient EMA transducer. Taking into account that the value of the detected effect depends significantly on the steel grade, we can assume its possible application in the methods of express analysis, estimation of structural and stressed states.

Keywords: linearly extended objects, the effectiveness of electromagnetic-acoustic conversion, dynamic biasing, the bias coil.

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

Адрес для переписки:

Волкова Л.В.
Ижевский государственный технический
университет им. М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Address for correspondence:

Volkova L.V.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Для цитирования:

Злобин Д.В., Волкова Л.В.
Влияние динамического подмагничивания на эффективность
электромагнитно-акустического преобразования при волноводном
контроле прутков.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 236–245.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

For citation:

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 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

Введение

Большинство методик акустической дефектоскопии и структуроскопии базируется на методах с использованием контактных пьезоэлектрических преобразователей, при этом предъявляются высокие требования к геометрическим размерам, плоскопараллельности поверхности ввода и отражающей поверхности, чистоте обработки поверхности, качеству контакта и др. Недостаточно высокая точность методик, а также необходимость использования эталонных образцов ограничивают их применение.

Электромагнитно-акустический (ЭМА) метод возбуждения-приема ультразвуковых волн является, безусловно, наиболее перспективной заменой контактных способов [1–3] и обладает рядом преимуществ перед альтернативными бесконтактными способами [4]. Его использование обеспечивает аппаратуре неразрушающего контроля ряд преимуществ: снижение требований к чистоте поверхности объекта контроля (ОК), возможность возбуждать волны различных типов, повышение производительности, контроль в условиях высоких температур и др. [5]. Вместе с тем существенным препятствием внедрению ЭМА метода является его низкая эффективность. Согласно [6–7], значение двойного коэффициента преобразования ЭМА метода не превышает 10^{-4} , что вынуждает применять в аппаратуре ЭМА контроля генераторы и системы подмагничивания повышенной мощности, а также ряд специальных методов, нацеленных на повышение отношения сигнал-шум. К ним относятся, в частности, применение когерентной обработки (суммирование сигнала с последующим его усреднением), возбуждение ЭМА датчика пакетными импульсами тока, сигналами с индивидуальными признаками – частотой заполнения, длительностью, амплитудой, ориентацией вектора поляризации и фазой с последующей корреляционной обработкой, использование узкополосных усилителей [8–10]. Особенно перспективным представляется сочетание ЭМА метода с волноводными способами контроля, так как при этом существенно возрастают производительность, надежность выявления дефектов. Переходу к полностью бесконтактной методике (т.е. к использованию ЭМА датчика и в качестве приемника) препятствует отсутствие достоверных данных об эффективности ЭМА преобразования в различных марках стали.

Одним из способов повышения эффективности ЭМА преобразования является увеличение

величины поля постоянного подмагничивания, в частности с использованием импульсного поляризующего магнитного поля в зоне возбуждения акустических импульсов, повышения амплитуды возбуждающего сигнала и увеличения чувствительности приемного тракта [11–12]. Исследования влияния внешнего постоянного магнитного поля на эффективность ЭМА преобразования и скорости поперечного звука показали, что в области температур фазовых переходов между магнитными структурами наблюдаются интенсивная генерация и аномалии скорости поперечных ультразвуковых волн [13], однако для конструкционных сталей данная зависимость не наблюдается. Целью данной работы было исследование способа повышения эффективности ЭМА преобразования с использованием изменяющегося во времени поля подмагничивания.

Используемые подходы

В волноводной технологии контроля линейно-протяженных объектов, описанной в [14–17], ЭМА преобразователь используется для возбуждения моды S_0 стержневой волны, отражение которой от дефектов фиксируется контактным пьезопреобразователем, установленным на торце ОК. Данная методика реализована в виде акустических дефектоскопов (АДНШ, АДП), внедренных на ряде предприятий нефтедобывающей и машиностроительной областей. Сочетание бесконтактного возбуждения и пьезоприема позволяет получить достаточно высокое значение коэффициента двойного преобразования. Однако использование в качестве приемника контактного пьезодатчика приводит к некоторым ограничениям: зависимости амплитуды сигнала от качества акустического контакта с торцом ОК, необходимости его подготовки и нанесения контактной смазки, достаточно высокой добротности пьезоприемника (увеличивает «мертвую зону» и ухудшает разрешающую способность метода).

В [18–19] показана возможность реализации волноводного контроля в варианте полностью бесконтактной методики ЭМА контроля за счет применения новой схемы формирования зондирующего импульса (двухполярное возбуждение) и специализированных ЭМА преобразователей проходного типа.

Исследования показали, что диапазон амплитуд сигнала при использовании ЭМА приемника может составлять от 0,7 мВ для сталей с низкой эффективностью ЭМАП (А35Г2, 15Х2ГМФ,

АС14, 38ХМА, Сталь 20) до 50–150 мВ для преобразования (12Х18Н10Т, 20Х13, Н29К18, 03Х17Н5ДЗБ) (таблица).

Таблица/Table

Амплитуды эхо-сигналов в различных марках стали при использовании ЭМА и пьезоприемника
Amplitudes of echo signal in different steel grades using an EMA and piezo-receiver

Марка стали Steel grades	$\frac{U_{\text{ЭМА-ЭМА}}}{U_{\text{ЭМА-ЭМА}}}$, мВ mV	$\frac{U_{\text{ЭМА-пьезо}}}{U_{\text{ЭМА-пьезо}}}$, мВ mV	K^2 (ЭМА-ЭМА) K^2 (EMA-EMA)	K^2 (ЭМА-пьезо) K^2 (EMA-piezo)
A35Г2	0,7	150	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$
15Х2ГМФ	1,4	680	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
АС14	2,7	200	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
38ХМА	2,7	410	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
20	4,0	380	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
A12	6,0	320	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
35	8,0	200	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
20895	8,0	250	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
P6M5K5	20	300	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
12Х18Н10Т	53	200	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
20Х13	56	800	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
H29K18	58	1500	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
03Х17Н5ДЗБ	150	600	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$

$U_{\text{ЭМА-ЭМА}}$ – напряжение на приемном датчике при использовании ЭМА излучателя и ЭМА приемника

$U_{\text{ЭМА-ЭМА}}$ – the voltage at the receiving sensor when using the EMR emitter and the EMA receiver;

$U_{\text{ЭМА-пьезо}}$ – напряжение на приемном датчике при использовании ЭМА излучателя и пьезоприемника

$U_{\text{ЭМА-пьезо}}$ – voltage on the receiving sensor when using the EMR emitter and the piezo-receiver;

K^2 – коэффициент двойного преобразования, отношение амплитуды зондирующего импульса к принятому сигналу / K^2 – the coefficient of double conversion, the ratio of the amplitude of the probe pulse to the received signal.

Значительный разброс амплитуд сигналов в различных марках стали при идентичных условиях возбуждения и геометрии объекта свидетельствует о магнитострикционном механизме ЭМА преобразования.

Установка для реализации эффекта динамического подмагничивания

Для контроля сталей с низкой эффективностью ЭМА приема необходимы новые технические решения, направленные на увеличение амплитуды сигнала. При проведении измерений зависимости амплитуды ЭМА преобразования от величины поля подмагничивания зафиксировано следующее явление: в случае, если в момент приема поле подмагничивания изменяло свое значение, регистрировалось значительное увеличение сигнала на ЭМА приемнике.

Таким образом, было установлено, что одним из факторов, определяющих величину сигнала на ЭМА приемнике, является скорость изменения внешнего продольного (для линейно-протяженных объектов) подмагничивания.

Для исследования эффекта повышения эффективности ЭМА преобразования в условиях динамического подмагничивания была изготовлена установка, блок-схема которой приведена на рисунке 1.

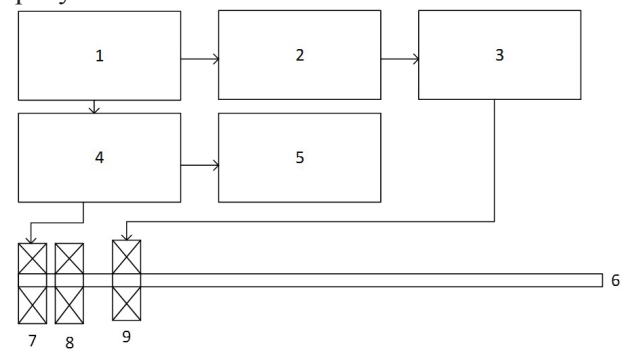


Рисунок 1 – Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор треугольного сигнала; 2 – компаратор; 3 – генератор зондирующего импульса; 4 – усилитель мощности; 5 – осциллограф; 6 – объект контроля; 7 – источник поля подмагничивания; 8 – ЭМА приемник; 9 – ЭМА излучатель

Figure 1 – Block diagram of the experimental device: 1 – triangular signal generator; 2 – comparator; 3 – the probe pulse generator; 4 – power amplifier; 5 – an oscilloscope; 6 – object of control; 7 – source of the bias field; 8 – EMA receiver; 9 – EMA emitter

Выходное напряжение генератора треугольных импульсов 1 поступает на вход усилителя мощности 4, питающего соленоид подмагничивания 7 и одновременно на вход компаратора 2, при срабатывании которого происходит запуск генератора зондирующих импульсов 3. Таким образом, регулировка опорного напряжения компаратора

позволяет изменять абсолютную величину поля подмагничивания, при котором происходит прием сигнала, а изменение коэффициента усиления – скорость изменения поля.

Принципиальные схемы основных блоков установки для реализации эффекта динамического подмагничивания представлены на рисунках 2–4.

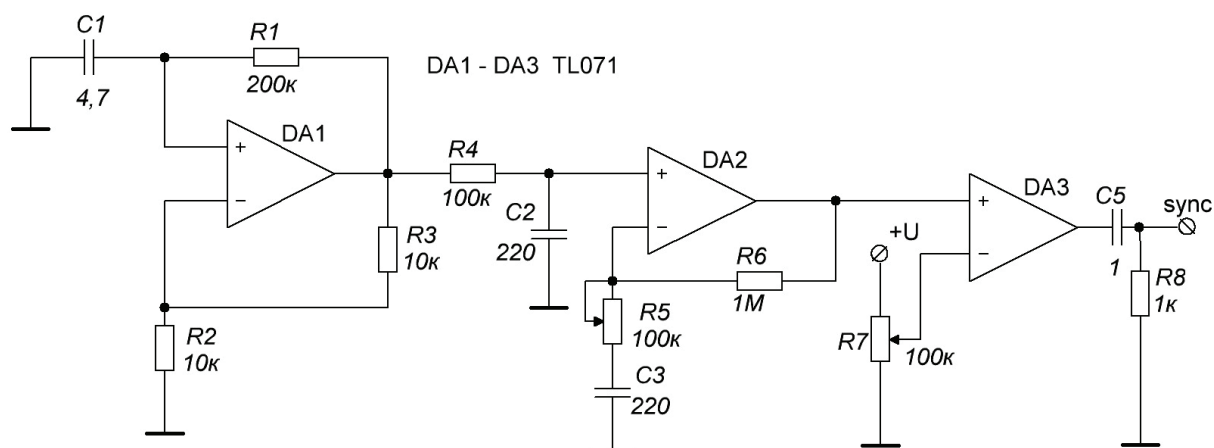


Рисунок 2 – Принципиальная схема задающего генератора установки динамического подмагничивания

Figure 2 – Schematic diagram of the master generator of the dynamic magnetization device

Основой установки является генератор релаксационного типа (рисунок 2), вырабатывающий импульсы прямоугольной формы с частотой порядка 2 Гц. Данные импульсы интегрируются цепью $R4C2$, в результате приобретают форму линейно-нарастающего сигнала (треугольную). Последующий каскад ($OY DA1.2$) обеспечивает требуемое усиление, необходимое для регулировки скорости нарастания напряжения, выход данного каскада подключен ко входу усилителя

мощности, питающего подмагничивающую катушку. Схема сравнения (ОУ DA2.1) имеет регулировку уровня срабатывания и используется для установки момента запуска генератора зондирующих импульсов, синхросигналы для которого формируются дифференцирующей цепью C4R8.

Принципиальная электрическая схема генератора зондирующих импульсов приведена на рисунке 3.

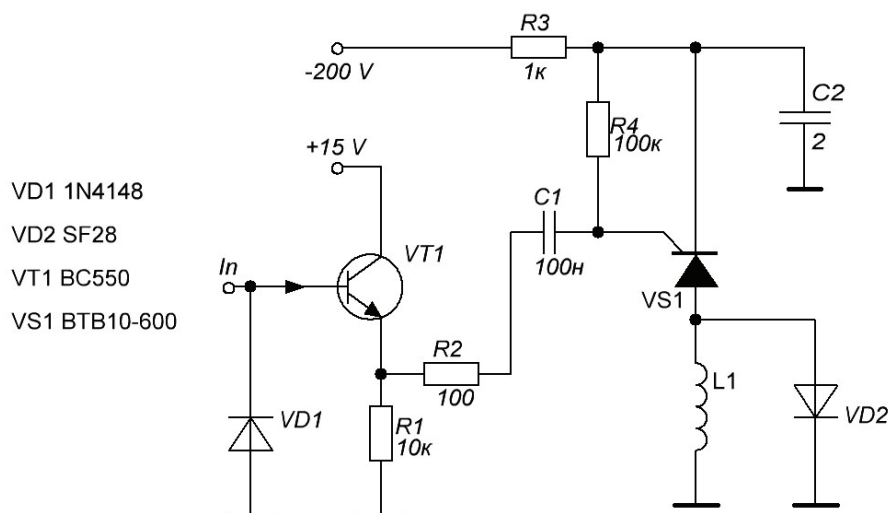


Рисунок 3 – Принципиальная схема генератора зондирующих импульсов

Figure 3 – Schematic diagram of the initial pulse indication generator

Диод $VD1$ предохраняет переход база-эмиттер транзистора $VT1$ от выбросов отрицательного напряжения. $VT1$ обеспечивает необходимый для открытия тиристора $VS1$ ток управляющего электрода. Включение $VS1$ выбрано таким, чтобы в состоянии покоя датчик находился под нуле-

вым потенциалом. Сопротивление $R4$ обеспечивает выравнивание потенциалов анода тиристора и управляющего электрода. Длительность импульса (30–50 мкс) определяется емкостью накопительного конденсатора $C2$ и индуктивностью датчика $L1$. Пиковый ток импульса – порядка 50 А.

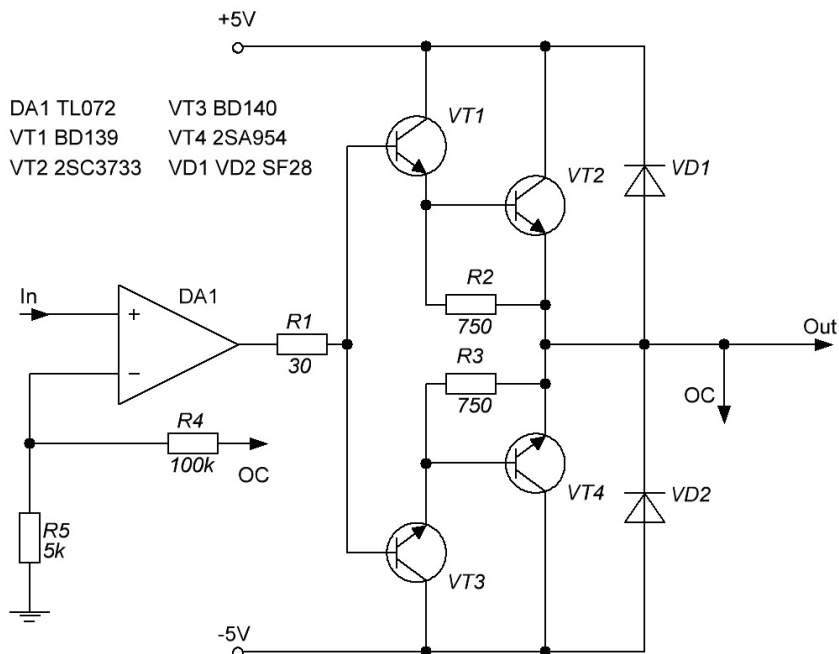


Рисунок 4 – Принципиальная схема усилителя мощности подмагничивающей катушки

Figure 4 – Schematic diagram of the power amplifier of the magnetization coil

Усилитель мощности подмагничивающей катушки (рисунок 4) выполнен по неинвертирующей схеме с использованием ОУ, усиленного двухкаскадным комплементарным эмиттерным повторителем. Так как изменение тока подмагничивания имеет невысокую скорость, переходные искажения эффективно корректируются цепью обратной связи ($R4R5$). $R1$ предотвращает самовозбуждение схемы, резисторы $R2$, $R3$ ускоряют работу составных транзисторов. Диоды $VD1$, $VD2$ предохраняют выход усилителя

от выбросов противо-ЭДС подмагничивающей катушки.

Сравнительная амплитуда и форма серии импульсов многократных отражений при статическом и динамическом подмагничивании и при полном цикле перемагничивания приведены на рисунке 5. Предполагаем, что эффект увеличения эффективности ЭМА приема связан с существенным повышением подвижности доменов в изменяющемся магнитном поле, что приводит к большей степени их переориентации.

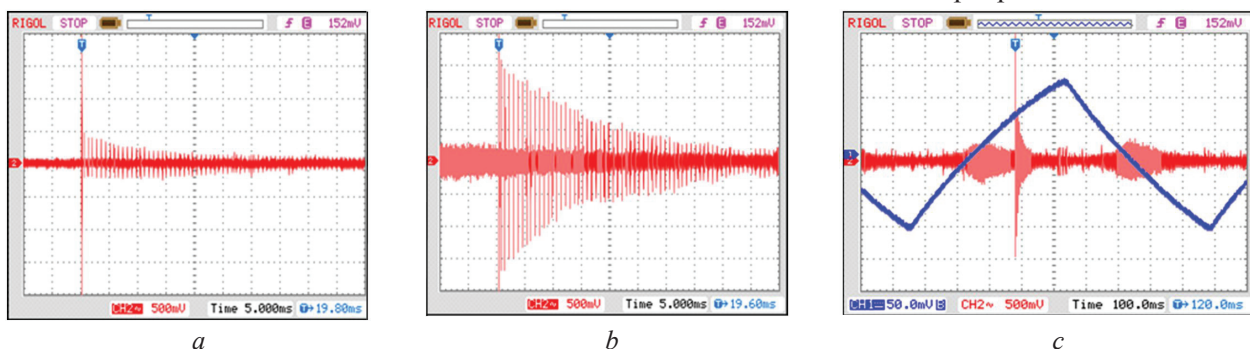


Рисунок 5 – Осциллограммы серии импульсов многократных отражений при статическом (a) и динамическом (b) подмагничивании, полный цикл перемагничивания (c)

Figure 5 – Oscillograms of a series of pulses of multiple reflections for static (a) and dynamic (b) bias, a complete cycle of magnetization reversal (c)

Исследование эффекта динамического подмагничивания

При проведении измерений зависимости амплитуды сигнала ЭМА преобразователя от величины поля подмагничивания было зафиксировано, что в случае изменения в момент приема значения поля подмагничивания (динамическое подмагничивание) регистрируется

значительное увеличение сигнала на ЭМА приемнике.

Для сравнения со статическим режимом подмагничивания с помощью источника постоянного напряжения в образце создавалось статическое магнитное поле той же величины. На рисунке 6 приведены графики зависимостей амплитуды ЭМА преобразования от напряженности поля подмагничивания для различных марок сталей.

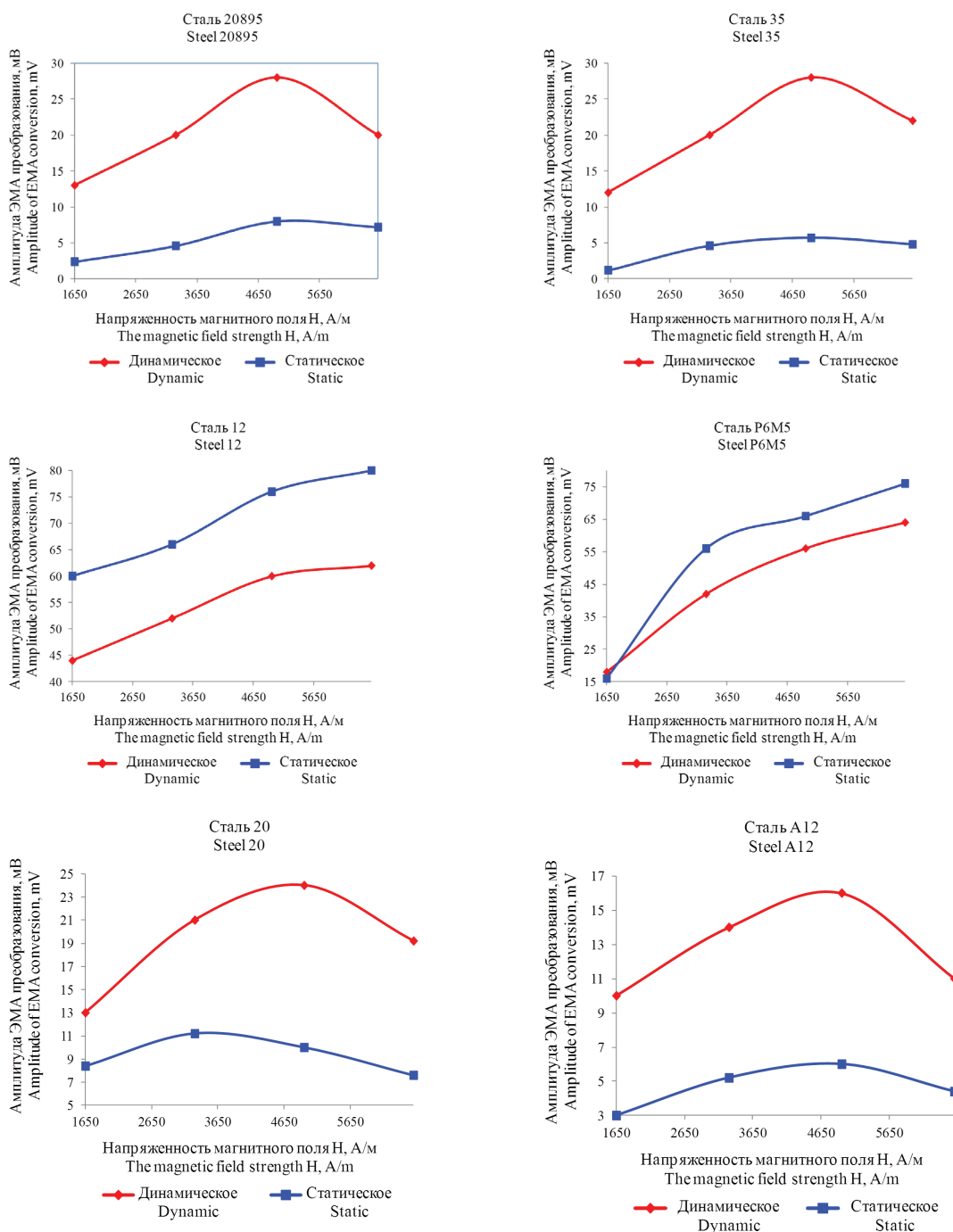


Рисунок 6 – Зависимость амплитуды электромагнитно-акустического преобразования от напряженности поля подмагничивания для образцов различных марок стали

Figure 6 – Dependence of the amplitude of the EMA conversion on the bias field magnetization

Измерения производились при напряженности магнитного поля от 1650 до 6000 А/м при этом измерения в статическом режиме проводились при той же напряженности поля, на которую был настроен компаратор в режиме динамического подмагничивания.

Измерения производились при скорости изменения напряженности поля $6 \cdot 10^4$ А·с/м. Выбор данного значения обусловлен тем, что величина амплитуды сигнала практически линейно растет с увеличением скорости изменения напряженности поля, однако проведение измерений при больших значениях скорости затруднительно вследствие того, что длительность серии эхо-импульсов становится сопоставимой со временем цикла перемагничивания прутка, что приводит к модуляции амплитуды принятого сигнала.

Результаты исследования показали, что для большинства образцов применение динамического подмагничивания позволяет получить существенное (до 5 раз) увеличение амплитуды сигнала на приемном ЭМА преобразователе. Таким образом, появляется возможность проводить контроль при меньших значениях подмагничивающего поля, а следовательно, снизить массогабаритные размеры магнитной системы.

Заключение

Достоверно установлено и количественно оценено увеличение амплитуды сигнала ЭМА приемника при динамическом подмагничивании. Применение разработанного метода делает возможным создание конструкций ЭМА приемников, обладающих высокой эффективностью приема при небольших значениях поля подмагничивания (динамического).

Полученные результаты могут способствовать разработке аппаратуры контроля линейно-протяженных объектов, использующей полностью бесконтактную методику возбуждения приема стержневой волны, обладающей при этом достаточно высокой чувствительностью, сопоставимой с применением контактного приемного преобразователя.

Установление механизмов, приводящих к столь значительному изменению амплитуды ЭМА преобразования при использовании динамического подмагничивания в контролируемом объекте, требует дальнейших исследований. Можно предположить, что эффект увеличения эффективности ЭМА приема связан с повышени-

ем подвижности доменов в изменяющемся магнитном поле, что приводит к большей степени их переориентации. Однако, возможной причиной фиксируемых в эксперименте результатов может быть наличие вихревых токов, возникающих в ОК при динамическом подмагничивании, приводящих к увеличению суммарного магнитного потока в объекте. Существенный интерес могут представлять исследования влияния переменного поля подмагничивания при стандартных ЭМА методиках возбуждения УЗ колебаний в объектах (использование плоского ЭМА преобразователя и накладной магнитной системы). Получение положительных результатов может способствовать разработке значительно более компактных и энергоэффективных, по сравнению с используемыми в настоящее время, преобразователей. Кроме того, наличие зависимостей амплитуды сигнала от величины и скорости изменения магнитного поля может быть использовано для получения дополнительных информативных параметров, например, для идентификации марок сталей.

Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 (2015-2017) Российского научного фонда.

Список использованных источников

1. Баев, А.Р. Особенности обнаружения поверхностных дефектов с помощью импульсно-лазерного возбуждения упругих волн / А.Р. Баев, А.И. Митьковец, Д.А. Костюк, Г.Е. Коновалов // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 286–295.
2. Баев, А.Р. Распространение волны Рэлея в твердых телах с технологическим выступом / А.Р. Баев, М.В. Асадчая, О.С. Сергеева, Г.Е. Коновалов // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2. – С. 121–128.
3. Takashi, Takishita. Development of shear-vertical-wave point-focusing electromagnetic acoustic transducer / Takishita Takashi, Ashida Kazuhiro, Nakamura Nobutomo, Ogi Hirotsugu, Hirao Masahiko // Japanese Journal of Applied Physics. – Vol. 54. – Number 7S1.
4. Степаненко, Д.А. Измерение пространственного распределения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах с помощью датчиков на основе эффекта Виллари / Д.А. Степаненко, К.А. Богданчук, В.Т. Минченя // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1. – С. 72–78.
5. Matthias, Sehera. On the separation of Lorentz and magnetization forces in the transduction mechanism of Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) / Matthias Sehera, Peter B. Nagy // NDT & E International. – 2016. – Vol. 84. – P. 1–10.
6. Ермолов, И.Н. Неразрушающий контроль:

справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

7. Budenkov, G.A. Influence of the chemical composition and temperature of metals on the efficiency of electromagnetic-acoustic transformation / G.A. Budenkov, O.V. Korobeinikova // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2009. – Vol. 45. – Is. 4. – P. 252–258.

8. Сучков, Г.В. Современные возможности ЭМА дефектоскопии / Г.В. Сучков // Дефектоскопия. – 2005. – № 12. – С. 24–39.

9. Муравьева, О.В. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О.В. Муравьева [и др.] // Датчики и системы. – 2013. – № 2. – С. 2–9.

10. Bing, Li. Application of electromagnetic acoustic in steel pipe inspection // Control Conference (CCC). – 2016. – 35th Chinese.

11. Dixon, S. High accuracy non-contact ultrasonic thickness gauging of aluminium sheet using electromagnetic acoustic transducers / S. Dixon, C. Edwards, S.B. Palmer // Ultrasonics. – 2001. – Vol. 39. – Is. 6. – P. 445–453.

12. Mikhailov, A.V. An electromagnetic-acoustic transducer with pulsed biasing / A.V. Mikhailov, Yu.L. Gobov, Ya.G. Smorodinskii, S.V. Shcherbinin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51. – Is. 8. – P. 467–475.

13. Buchel'nikov, V.D. Electromagnetic-acoustic transformation in an erbium single crystal / V.D. Buchel'nikov, I.V. Bychkov, Yu.A. Nikishin, S.B. Palmer, C.M. Lim, C. Edwards // Physics of the Solid State. – 2002. – Vol. 44. – No. 11. – P. 2116–2123.

14. Murav'eva, O.V. The effect of regular differences in a cross section on the testability of a rod tested by the acoustic waveguide method / O.V. Murav'eva, V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50. – Is. 4. – P. 219–226.

15. Муравьева, О.В. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин / О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, В.А. Стрижак, Е.Н. Кокорина, М.А. Лойферман // В мире неразрушающего контроля. – 2013. – № 1. – С. 52–60.

16. Murav'ev, V.V. An analysis of the comparative reliability of acoustic testing methods of bar stock from spring steels / V.V. Murav'ev, O.V. Murav'eva, V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin, E.N. Fokeeva // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50. – Is. 8. – P. 435–442.

17. Муравьев, В.В. Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60C2A при производстве пружин с наноразмерной структурой / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, Е.Н. Кокорина // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – Вып. 4. – С. 66–70.

18. Злобин, Д.В. Особенности построения аппара-

туры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн / Д.В. Злобин, О.В. Муравьева // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – № 4. – С. 99–104.

19. Muravyev, V.V. Quality control of heat treatment of 60C2A steel bars using the electromagnetic-acoustic method / V.V. Muravyev, O.V. Muravyeva, E.N. Kokorina // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. – Vol. 49. – Is. 1. – P. 15–25.

This work was supported by the Russian Science Foundation (№ 15-19-00051 (2015–2017)).

References

1. Baev A.R., Mitkovets A.I., Kostiuk D.A., Kononov G.E. [Peculiarities of the surface flaw detection by elastic waves simulated by pulse-laser radiation]. *Devices and Methods of Measurements*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 286–295 (in Russian).

doi: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

2. Baev A.R., Asadchaya M.V., Sergeeva O.S., Kononov G.E. [Propagation of rayleigh wave in solids with fillet transitions]. *Devices and Methods of Measurements*, 2011, no. 2, pp. 127–128 (in Russian).

3. Takishita Takashi, Ashida Kazuhiro, Nakamura Nobutomo, Ogi Hirotsugu, Hirao Masahiko Development of shear-vertical-wave point-focusing electromagnetic acoustic transducer. *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 54, no. 7S1

(<https://doi.org/10.7567/JJAP.54.07HC04>).

4. Stepanenko D.A., Bogdanchuk K.A., Minchenya V.T. [Measurement of spatial distribution of mechanical stresses in ultrasonic waveguide systems by means of sensors based on Villari effect]. *Devices and methods of measurements*, 2013, no. 1, pp. 72–78 (in Russian).

5. Matthias Sehera, Peter B. Nagy. On the separation of Lorentz and magnetization forces in the transduction mechanism of Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs). *NDT & E International*, 2016, vol. 84, pp. 1–10 (<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.07.001>).

6. Ermolov I.N., Lange Yu.V., ed. Klyuev V.V. *Nerazrushayushchii kontrol'* [Nondestructive testing]: Handbook in 7 vol. Under general. Vol. 3: Ultrasonic testing, Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2004, 864 p.

7. Budenkov G.A., Korobeinikova O.V. Influence of the chemical composition and temperature of metals on the efficiency of electromagnetic-acoustic transformation. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, vol. 45, is. 4, pp. 252–258. doi: 10.1134/S1061830909040056

8. Suchkov G.M. State-of-the-art capabilities of EMA flaw detection. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, vol. 41, is. 12, pp. 790–801. doi: 10.1007/s11181-006-0035-2

9. Muraveva O.V., Muravyov V.V., Kokorina E.N., Sterkhov V.D., Malyutin D.V. [Optimization of bias mag-

netization systems for electromagnetically-acoustic bulk transducers for non-destructive control of bar rolling]. *Datchiki i sistemi* [Sensors and systems], 2013, no. 2, pp. 2–9 (in Russian).

10. Bing Li. Application of electromagnetic acoustic in steel pipe inspection. *Control Conference (CCC)*, 2016, 35th Chinese (10.1109/ChiCC.2016.7554872).

11. Dixon S., Edwards C., Palmer S.B. High accuracy non-contact ultrasonic thickness gauging of aluminium sheet using electromagnetic acoustic transducers. *Ultrasonics*, 2001, vol. 39, is. 6, pp. 445–453.

12. Mikhailov A.V., Gobov Yu.L., Smorodinskii Ya.G., Shcherbinin S.V. An electromagnetic–acoustic transducer with pulsed biasing. *Russian Journal of Non-destructive Testing*, 2015, vol. 51, is. 8, pp. 467–475.

13. Buchel'nikov V.D., Bychkov I.V., Nikishin Yu.A., Palmer S.B., Lim C.M., Edwards C. Electromagnetic-acoustic transformation in an erbium single crystal. *Physics of the Solid State*, 2002, vol. 44, no. 11, pp. 2116–2123.

14. Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V. The effect of regular differences in a cross section on the testability of a rod tested by the acoustic waveguide method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, is. 4, pp. 219–226. doi: 10.1134/S1061830914040068

15. Muravjeva O.V., Muravjev V.V., Strizhak V.A.,

Kokorina E.N., Loyferman M.A. [Spring Manufacturing. Real Sensitivity of Bar Workpiece Incoming Acoustic Inspection]. *In the world of nondestructive testing*, 2013, no. 1, pp. 52–60 (in Russian).

16. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Fokeeva E.N. An analysis of the comparative reliability of acoustic testing methods of bar stock from spring steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, is. 8, pp. 435–442.

doi: 10.1134/S1061830914080063

17. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Kokorina E.N. [Acoustic Structuroscopy and Flaw Detection of Rods of 60C2A Steel in the Production of Springs with a Nanoscale Structure]. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous metallurgy]. 2013, is. 4, pp. 66–70 (in Russian).

18. Zlobin D.V., Muraveva O.V. [Features of the construction of equipment for electromagnetic-acoustic flaw detection of bar stock using rod waves]. *Bulletin of the Izhevsk State Technical University* [Vestnik Izhevsk State Technical University]. 2012, no. 4, pp. 99–104 (in Russian).

19. Muravyev V.V., Muravyeva O. V., Kokorina E.N. Quality control of heat treatment of 60C2A steel bars using the electromagnetic-acoustic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2013, vol. 49, is. 1, pp. 15–25.