

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 620.179.162

Д. В. Злобин, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
 О. В. Муравьёва, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТУРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ПРУТКОВОГО ПРОКАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕРЖНЕВЫХ ВОЛН*

Предложены подходы к построению аппаратуры для реализации волноводного акустического контроля в бесконтактном варианте электромагнитно-акустического преобразования, как в режиме приема, так и в режиме излучения. Представлены преимущества реализованного с помощью разработанной аппаратуры метода многократных отражений.

Ключевые слова: волноводный акустический контроль, многократные отражения, электромагнитно-акустические преобразователи, пьезоэлектрические преобразователи, генератор зондирующих импульсов, двухполярное возбуждение.

Готовый прокат (листовой и сортовой) является наиболее массовой продукцией черной металлургии, которую потребляют другие отрасли промышленности. В условиях высоких темпов развития прокатного производства, оснащения предприятий современным прокатным оборудованием, расширения марочного и размерного сортамента проката, создания новых и усовершенствования существующих технологических процессов возрастают требования к качеству металлопродукции. Неразрушающий контроль сортового проката важен как на стадии приемочного контроля у предприятий-изготовителей, так и на стадии входного контроля у потребителей.

Традиционно для контроля сортового проката используют вихретоковый, магнитный и ультразвуковой (УЗ) методы контроля, требующие сканирования тела объекта и применения соответствующих средств автоматизации [1]. Вихретоковые и магнитоиндукционные методы, несмотря на преимущество бесконтактной работы, выявляют лишь поверхностные и приповерхностные дефекты, при этом получаемая информация зависит от ряда факторов (зазор, магнитные и электрические характеристики объекта), что приводит к проблемам при идентификации дефектов. Контактные УЗ-методы, несмотря на возможность выявления внутренних и поверхностных дефектов, требуют специальной подготовки поверхности объекта и реализуются, как правило, в иммерсионном варианте.

Волноводные акустические методы контроля, основанные на использовании нормальных волн в стержнях, имеют неоспоримое преимущество в сравнении с традиционными методами – отсут-

ствие необходимости сканирования тела объекта ввиду возбуждения зондирующих импульсов с торцов объекта, в связи с чем метод может быть реализован в ручном варианте при сохранении достаточно высокой производительности контроля.

Разработанная в ГОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова» под руководством профессора Г. А. Буденкова новая прогрессивная технология акустического волноводного контроля с использованием стержневых и крутильных волн, эффективно используется при контроле прутков, насосных штанг, насосно-компрессорных труб [2, 3] и реализована при помощи ряда акустических дефектоскопов (акустический дефектоскоп насосных штанг АДНШ, акустический дефектоскоп прутков АДП, акустический дефектоскоп насосно-компрессорных труб АДНКТ), внедренных на предприятиях нефтепромышленного и нефтедобывающего оборудования и машиностроительных предприятиях и доказавших высокую эффективность метода по сравнению с традиционными. Электроакустические преобразователи в разработанной аппаратуре основаны на бесконтактном варианте электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразования в режиме излучения и контактном варианте пьезоэлектрического преобразования в режиме приема, что приводит к некоторым ограничениям в реализации указанной технологии.

В связи с этим представляется целесообразным разработку аппаратуры для реализации технологии в полностью бесконтактном варианте электромагнитно-акустического преобразования, как в режиме приема, так и в режиме излучения. В статье рассмотрены подходы к построению аппаратуры для реали-

© Злобин Д. В., Муравьёва О. В., 2012

Получено 27.09.12

* Работа выполнена при поддержке Программы инициативных проектов фундаментальных исследований, выполняемых в учреждениях УрО РАН в 2012–2014 гг. (регистрационный номер 12-У-2-1013); в соответствии с разделом 2 мероприятий Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» на 2012–2016 гг. (проект ПСР/М2/Н2.5/МВВ).

зации волноводного акустического контроля в бесконтактном варианте.

Используемые подходы и полученные результаты

В дефектоскопе, основанном на акустическом волноводном принципе, использован эхо-импульсный метод контроля. Структурная схема дефектоскопа АДП представлена на рис. 1. Генераторы блоков ГПУ вырабатывают короткие токовые импульсы высокой амплитуды (20...100 А), подаваемые на ЭМА излучателями блока ЭАП, что приводит к возникновению акустического импульса, распространяющегося в прутке 2 со скоростью C_{s0} продольной стержневой моды ($C_{s0} = 5200$ м/с). Акустический импульс, отраженный от дефектов прутка типа нарушения сплошности, а также от ее торца, принимается на том же торце пьезоэлектрическим приемником блока ЭАП и в виде электрического сигнала поступает на предусилитель блока ГПУ. Предусилитель блока ГПУ обеспечивает фильтрацию и предварительное усиление сигналов без ограничения и имеет фиксированный коэффициент усиления. Коммутатор блока УКП поочередно включает в работу блоки обоих акустических каналов. Дефектоскопия производится с двух торцов прутка с целью уменьшения неконтролируемых (мертвых) зон со стороны блока ЭАП. Программируемый усилитель блока УКП осуществляет дальнейшее усиление сигналов, его коэффициент усиления автоматически выбирается так, чтобы измеряемый сигнал не входил в ограничение. Электрический сигнал с усилителя поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП и далее – в память персонального компьютера ПК. Управление работой всех электронных узлов системы производится программно.

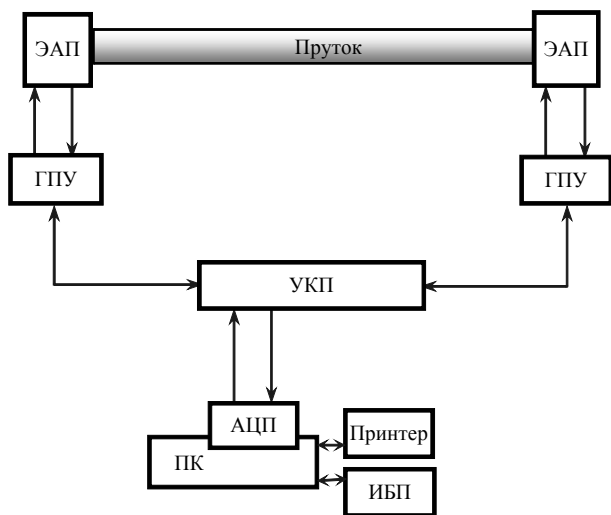


Рис. 1. Структурная схема дефектоскопа АДП: ЭАП – блок электроакустических преобразователей; ГПУ – блок генератора и предусилителя; УКП – блок программируемого усилителя, коммутации и источника питания; АЦП – плата аналого-цифрового преобразования; ПК – персональный компьютер

Результаты дефектоскопии прутка выводятся на экран персонального компьютера в виде графических

дефектограмм по двум каналам и таблицы с информацией о длине контролируемого прутка (мм), координатах обнаруженных дефектов (мм) и амплитудах эхо-сигналов от них (%). На графической дефектограмме (рис. 2) отображаются зондирующий импульс и первый эхо-импульс, отраженный от противоположного торца прутка. Наличие дефектов в прутке приводит к появлению на участке между зондирующим импульсом и эхо-импульсом от торца прутка эхо-импульсов от дефектов. Определение координат дефекта по длине прутка производится из учета скорости прохождения акустического импульса по прутку и времени между зондирующим импульсом и эхо-импульсом от дефекта. Амплитуда эхо-импульса от дефекта пропорциональна размеру дефекта. С целью отстройки от качества акустического контакта и эффективности возбуждения волны в различных марках стали амплитуда эхо-импульса от дефекта нормируется к амплитуде первого эхо-импульса от торца прутка. Данный параметр является основой для автоматического предположения о годности или браке прутка в соответствии с уровнем браковки, который может быть рассчитан, например, исходя из предельного отклонения диаметра тела прутка от номинального значения по нормативным документам.

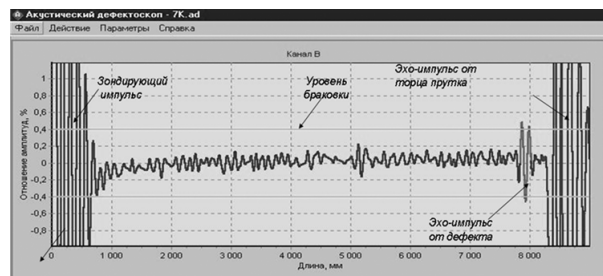


Рис. 2. Типичная дефектограмма прутка с локальным дефектом

Результаты исследования процессов взаимодействия стержневых волн с искусственными и естественными поверхностными и внутренними дефектами показали [4], что волны отражаются как от мест изменения механического импеданса объекта $Z_m = SpC = S\sqrt{E\rho}$ (S – площадь сечения; C – скорость звука; ρ – плотность среды), так и от участков, содержащих концентраторы напряжений. К первым относятся вмятины, механические повреждения, пленки, утяжины, закаты, расслоения, ко вторым – трещины, волосовины. При этом глубина и раскрытие волосовин и трещин, размеры инородных включений могут составлять сотые или тысячные доли от длины акустической волны на основной частоте спектра зондирующих импульсов, то есть обеспечивается высокая чувствительность к опасным внутренним и поверхностным дефектам.

При использовании в данной технологии в качестве приемника контактного пьезоэлектрического преобразователя возникает ряд ограничений, не позволяющих реализовать все преимущества данной технологии в полной мере:

– ввиду зависимости амплитуды донного сигнала от качества акустического контакта пьезоприемника с торцом объекта контроля воспроизводимость и достоверность метода ухудшается при неплоском торце, например, в случае рубки прутков перед контролем;

– высокая добротность пьезоприемника при использовании низких частот приводит к ухудшению лучевой разрешающей способности метода (200...400 мм), что ощутимо отражается на возможности выявления отдельно двух близлежащих дефектов, на уровне акустических структурных помех [5];

– для обеспечения надежного акустического контакта пьезопреобразователя с торцом объекта контроля требуется введение дополнительной операции в технологический процесс контроля для подготовки поверхности торца изделия (механическая зачистка, удаление заусенцев и пр.);

– необходимость использования контактной смазки между пьезоприемником и торцом прутка приводит к загрязнению датчика, необходимости периодической его очистки, выходу из строя элементов конструкции, плохо переносящих контакт со смазочными жидкостями, и, как следствие, уменьшению срока службы пьезопреобразователя;

– необходимость двухстороннего доступа к торцам прутка для установки блоков ЭАП требует обслуживания дефектоскопа двумя рабочими (в случае ручного варианта контроля).

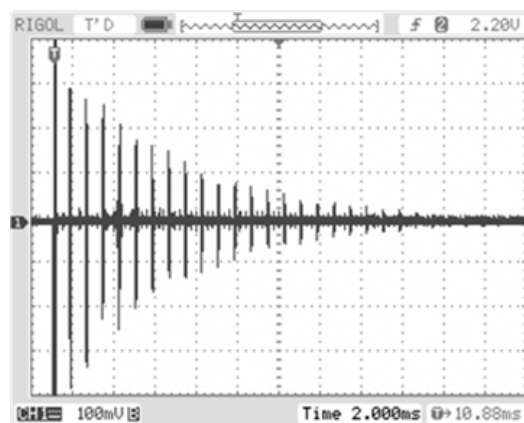
В [6] показано, что вследствие малого затухания стержневые волны могут распространяться на большие расстояния, что позволяет наблюдать серию многократных отражений в достаточно протяженных прутках и реализовать метод многократных отражений, обеспечивающий ряд дополнительных возможностей при контроле:

– существенное повышение чувствительности к дефектам при анализе сигнала на дальних отражениях;

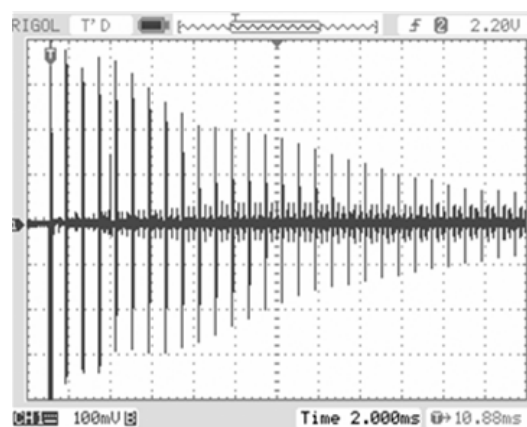
– высокая точность определения скорости и затухания при анализе дальних отражений;

– возможность реализации контроля при одностороннем доступе к торцу прутка при отсутствии мертвой зоны со стороны ввода.

На рис. 3 представлены серии многократных отражений стержневой волны в прутке, полученных в режиме ЭМА-излучения и пьезоприема и ЭМА-излучения и ЭМА-приема. Быстрое затухание серии многократных отражений (рис. 3, а) при использовании контактного приемного преобразователя за счет «откачки» энергии на границе торец – преобразователь при каждом переотражении не позволяет реализовать все возможности метода многократных отражений в полной мере. Поэтому перспективным представляется переход на полностью бесконтактный ЭМА-вариант реализации метода многократных отражений, ослабление серии эхо-импульсов при котором происходит в существенно меньшей степени (только за счет затухания акустических волн в объекте) (рис. 3, б).



а



б

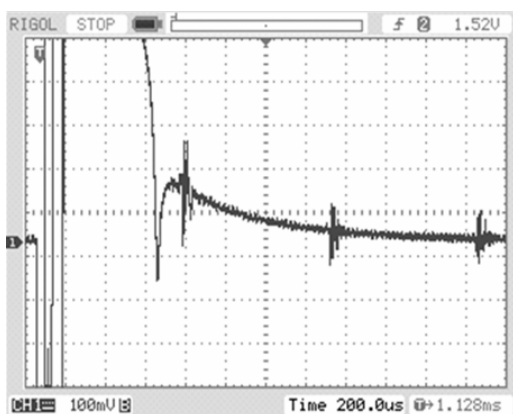
Рис. 3. Серия многократных отражений от торцов и дефекта в прутке: а – ЭМА-излучение, пьезоприем; б – ЭМА-излучение, ЭМА-прием

Развитие методов неразрушающего контроля с использованием бесконтактных ЭМА-преобразователей обусловлено рядом существенных эксплуатационных достоинств [7], в частности: возможностью контроля через воздушный зазор без применения контактных жидкостей, в том числе в условиях высоких температур; отсутствием износа ЭМА-преобразователей; независимостью результатов контроля от перекосов преобразователей относительно поверхности объекта и от наличия на поверхности изделия ржавчины, окалины, краски, загрязнений; возможностью возбуждения и приема нескольких частот упругих колебаний и любых типов волн.

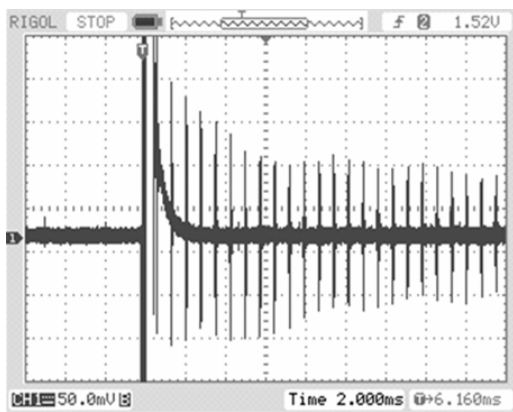
К недостаткам ЭМА-преобразователей необходимо отнести низкую чувствительность при приеме, определяемую как отношение амплитуды электрического к амплитуде акустического импульса, прошедшего на ЭМА-преобразователь. Так, использование в качестве приемника пьезоэлектрического преобразователя позволяет получить уровень принимаемого сигнала от сотен милливольт до единиц вольт (без дополнительного усиления), при этом пьезоприемник весьма слабо реагирует на электромагнитные наводки. Совокупность этих качеств позволяет получить в варианте пьезоприема отношение

сигнал / шум, достигающее нескольких тысяч раз. При более высокой чувствительности к внешним наводкам уровень сигнала для ЭМА-приемника – не более десятков милливольт, при этом амплитуда определяется магнитными и электрическими свойствами материала объекта и величиной поля подмагничивания.

Другая проблема, возникающая при реализации бесконтактного ЭМА-варианта приема акустических волн, – высокая степень влияния зондирующего импульса на приемный ЭМА-преобразователь. При расположении излучающего и приемного ЭМА-преобразователей вблизи одного торца объекта на вход усилительного тракта воздействует наводка, достигающая нескольких киловольт (приемный ЭМА-преобразователь, содержащий большое число витков, работает как вторичная обмотка повышающего трансформатора), при этом длительность процесса сопоставима с длительностью зондирующего импульса и составляет 20...30 мкс. Кроме непосредственной передачи высокочастотного воздействия на приемник имеет место гораздо более длительный (несколько мс) процесс, обусловленный релаксацией цепей усилительного тракта, вызванной воздействием импульса, значительно превышающего рабочий диапазон усилителя. Влияние этих эффектов на осциллограмму при прозвучивании прутка показано на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Влияние на дефектограмму прутка наводки зондирующего импульса: а – на первом отражении; б – на многократных отражениях

Для реализации метода многократных отражений в полностью бесконтактном ЭМА-варианте необходимо минимизировать влияние обоих механизмов на усиливаемый сигнал. Попытка использования традиционных схемотехнических решений при построении приемного тракта для ограничения его перегрузки (диодная защита и фильтрация сигнала в частотной области) не приводит к положительным результатам. Так, даже импульс величиной 0,6 В, прошедший через диодный ограничитель, при малых амплитудах принимаемого сигнала переводит каскады усилителя в режим глубокого насыщения. Использование же частотно-зависимых цепей фильтрации малоэффективно, так как не полностью подавляет помеху, искажает форму импульса, приводит к неоднозначной частотной настройке тракта. Это связано с тем, что эффективная индуктивность приемного ЭМА-преобразователя, являющаяся в данном случае одним из элементов частотного фильтра, зависит как от магнитной проницаемости объекта контроля, так и от его остаточной намагниченности после воздействия зондирующего импульса, которые в условиях контроля прутков из разнообразных марок сталей труднопредсказуемы. Вышеперечисленные трудности обусловлены спецификой контроля с использованием волн Похгаммера – частотная область их эффективного возбуждения в длиномерных объектах лежит в области 10...50 кГц, что намного ниже, чем при традиционном ЭМА-контроле с использованием объемных волн (0,5...15 МГц). Отсутствие значительной разницы между рабочими частотами метода контроля и переходных процессов в усилительном тракте, а также большая энергия зондирующего импульса приводят к невозможности использования обычных методов фильтрации.

При использовании генератора зондирующих импульсов, выполненного по традиционной схеме, показанной на рис. 5 [8] (конденсатор, заряженный до высокого напряжения (200 В), периодически разряжающийся через мощный быстродействующий тиристор под действием управляющих импульсов задающего генератора), не удается сократить до минимума процесс релаксации усилителя после воздействия зондирующего импульса. Это связано с тем, что в процессе разряда ток в излучающем ЭМА-преобразователе протекает только в одну сторону, тракт после воздействия зондирующего импульса оказывается в состоянии глубокого насыщения, а его возвращение в исходное состояние вызывает длительный импульс помехи.

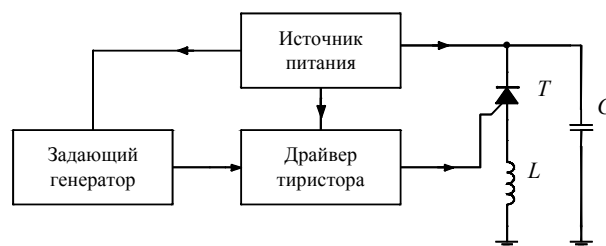


Рис. 5. Блок-схема однополярного генератора зондирующих импульсов

Для минимизации этого эффекта предложено использовать генератор с двухполярным возбуждением, схема которого представлена на рис. 6. Тактовый (задающий) генератор определяет частоту следования зондирующих импульсов, которая регулируется переменным резистором в пределах 1...100 Гц. Схема вырабатывает две последовательности тактовых импульсов, в одну из которых вводится задержка, регулируемая в пределах 5...50 мкс. Каждая из последовательностей управляет своим каналом формирования зондирующего импульса, схемы которых идентичны. Первый канал зондирующих импульсов формируется конденсатором $C1$, разряжающимся через тиристор $T1$, второй образован элементами $C2$ и $T2$ соответственно. Для формирования двухполярного импульса изготовлен излучающий ЭМА-преобразователь, состоящий из двух идентичных катушек индуктивности $L1$ и $L2$, расположенных коаксиально. Каждая катушка подключается к своему каналу излучения, причем выводы одной из них включаются противофазно. В результате на прутки воздействуют два импульса одинаковой амплитуды, но разной полярности, при точной настройке задержки между ними суммарное воздействие имеет вид симметричного двухполярного импульса (рис. 7). Значительное снижение амплитуды наводки достигается за счет того, что после воздействия первого полупериода вторая полуволна импульса практически сразу возвращает тракт в изначальное ненасыщенное состояние, поскольку зависимость реакции усилительного тракта на кратковременное воздействие высоковольтного импульса имеет интегральный характер.

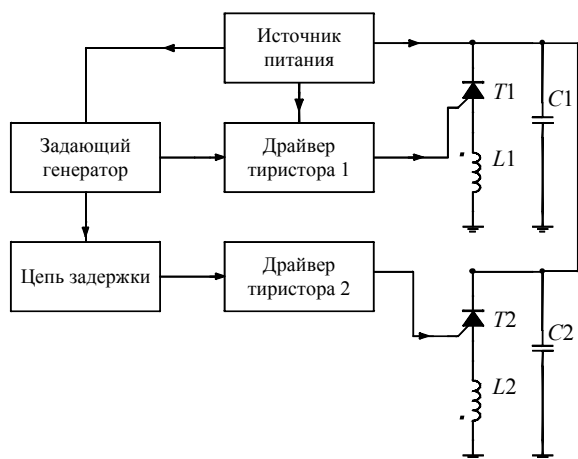
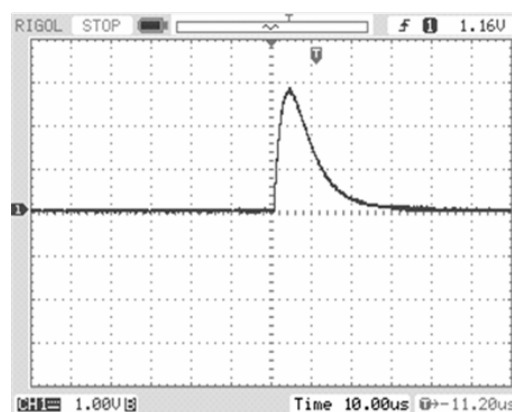


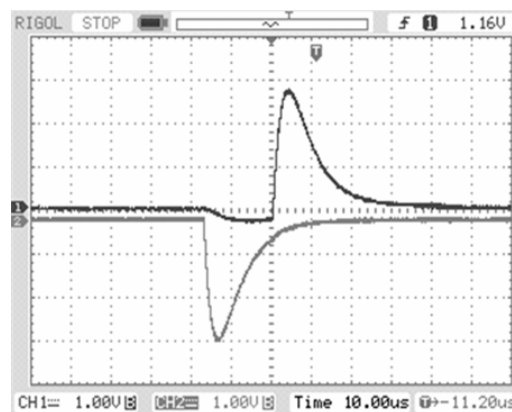
Рис. 6. Блок-схема двухполярного генератора зондирующих импульсов

Результаты испытаний предложенного подхода к построению аппаратуры ЭМА-дефектоскопии пруткового проката показали его высокую эффективность. На рис. 8 показан результат применения двухполярной схемы зондирования на образце прутка диаметром 4,5 мм, длиной 2 м, сталь Р6М5. Видно, что использование двухполярного зондирующего импульса позволило практически полностью подавить высокоамплитудную помеху, при этом величина мертвой зоны не превышает 450 мм (сопоставима

с применением пьезопреобразователя), амплитуда принятого сигнала, приведенная к входу, – 10 мВ, отношение сигнал/шум – порядка 100 раз. Кроме того, на некоторых марках стали при точной подстройке величины задержки наблюдается увеличение амплитуды принятого сигнала. Существенно, что при использовании двухполярного импульса возбуждения значительно снижается остаточная намагниченность прутка. Так, после воздействия однополярного импульса прутки оказываются намагниченными до величин порядка 0,05 Т (т. е. практически до величины, соответствующей предельной петле гистерезиса). В то время как при двухполярном импульсе возбуждения остаточная индукция образца не превысила 0,01 Т.



а



б

Рис. 7. Форма импульсов тока генератора зондирующих импульсов: а – при работе одного канала; б – совместное подключение обоих каналов (1 деление = 20 А)

Выводы

Таким образом, применение новой схемы формирования зондирующего импульса (двухполярное возбуждение) и разработанный подход к построению бесконтактных ЭМА-преобразователей впервые позволили реализовать полностью бесконтактную методику ЭМА-контроля линейно-протяженных объектов с применением волн Похгаммера, обладающую более высокой достоверностью и воспроизводимостью результатов контроля. Появилась возможность реализации всех преимуществ метода

многократных отражений при одностороннем доступе к торцу объекта и устранения ряда ограничений, присущих контактному пьезоэлектрическому приемнику. Разработанные новые конструкции ЭМА-преобразователей проходного типа не требуют

механического контакта с торцом объекта, следовательно, обладают значительно более длительным сроком службы и более широкой областью возможного применения в условиях ограниченной контролепригодности объектов.

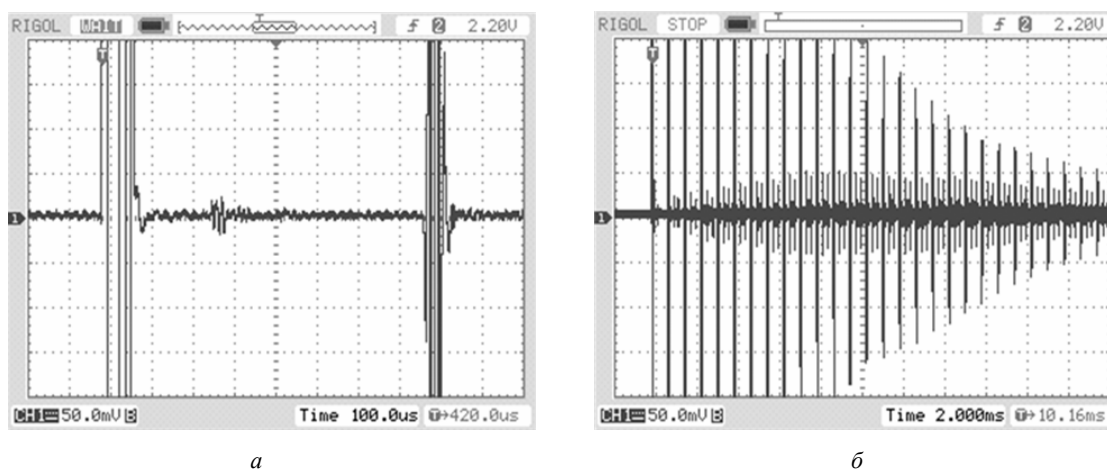


Рис. 8. Дефектограмма прутка при воздействии двухполярного зондирующего импульса:
а – первое отражение; б – серия многократных отражений

D. V. Zlobin, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

O. V. Muravieva, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Development Features of Electromagnetic Acoustic Defectoscopy Equipment for Bar Iron Using Rod Waves

Approaches to developing the equipment for implementation of waveguide acoustic testing in noncontact electromagnetic acoustic transformation both in receiving and in radiation modes are offered. Advantages of the multiple reflection method implemented with the developed equipment are presented.

Key words: waveguide acoustic testing, multiple reflection, electromagnetic acoustic transducers, piezoelectric transducers, outgoing pulse generator, bipolar excitation.

УДК 621.31

С. Г. Селетков, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

С. С. Иванова, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ С ПОПУТНОЙ КАЛИБРОВКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ

Предложена методика расчетно-эмпирического определения искомых физических или технических параметров процесса и характеристик среды протекания процесса. Суть методики состоит в использовании двоякого воздействия с различной интенсивностью на среду протекания процесса и параллельного измерения его параметров. В результате такого воздействия и измерения появляется возможность расчетным путем находить не только параметры процесса, но и характеристики среды, в которой протекает сам процесс. При этом попутно устанавливается связь между значением приборного сигнала и соответствующим ему значением параметра процесса.

Ключевые слова: метод измерения, калибровка первичных преобразователей, параметры процесса, характеристики среды протекания процесса.

Некоторые физические и технические параметры трудно, а иногда невозможно с требуемой точностью измерить непосредственно. К таким измерениям можно отнести измерение уровня жидкости в герметично закрытом сосуде

или толщины оболочки, например, корпуса крупногабаритного изделия, или избыточного давления в ударной волне. В каждом из этих случаев измерения требуется соответствующее приборное оборудование и первичные преобразователи, для которых