

УДК 620.179.162

DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166

## ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ ВОЛНОВОДНОМ МЕТОДЕ КОНТРОЛЯ

**В. А. Стрижак**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**Р. Р. Хасанов**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**А. В. Пряхин**, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Широкое распространение волноводных методик контроля протяженных объектов, в том числе с использованием электромагнитно-акустической технологии в условиях меняющегося рынка электронных компонентов, требует поиска новых подходов к конструированию электронного оборудования. Рассмотрены схематехнические решения, необходимые для построения генератора зондирующего импульса в информационно-измерительной системе, реализующей волноводную методику контроля протяженных объектов. Определены эксплуатационные требования к устройству и оценены необходимые характеристики компонентов импульсного генератора, влияющие на его поведение при формировании ударного импульса для ЭМА-излучателя. Получен критерий оценки работы генератора ударного импульса в виде длительности реверберационно-шумовой характеристики. Проведен частотный анализ системы возбуждения ЭМА-излучателя в зависимости от количества витков излучателя и величины активного сопротивления в системе. Произведена оценка максимального импульсного поля в ЭМА-излучателе и определено соответствующее для него оптимальное количество витков.*

*На основании оценки характеристик генератора и ЭМА-излучателя разработан электрический адаптер для дефектоскопа АДНШ, подключаемый к выходу генератора и входу приемника, позволяющий использовать пьезопреобразователь в совмещенном режиме. Устройство опробовано на стержнях композитной арматуры. Полученное значение РШХ составило около 500 мкс (соответствует 1,2 м).*

**Ключевые слова:** волноводный контроль, электромагнитно-акустический преобразователь, генератор для ЭМА-преобразователя, индуктор.

### Введение

**В**олноводные методики акустического контроля все шире применяются для контроля проката (стержни, прутки, штанги, трубы и т. д.) [1]. Достоинством методики является простота ее реализации, отсутствие сканирования, упрощенные требования к логистике и механизмам транспортировки объектов контроля, высокая производительность [2–4]. Особенностью реализации методики является использование низкочастотных импульсов при прозвучивании тела неподвижного объекта контроля датчиком, установленным на его торец [5, 6]. Акустический импульс генерируется излучателем датчика и в условиях низкого затухания проходит по телу объекта контроля, отражается от противоположного торца, возвращается по телу объекта контроля и достигает приемника. Затем импульс вновь отражается от торца, что и создает многократные отражения. Значительное время затухания импульсов требует временных пауз перед повторным прозвучиванием (не менее 0,4 с). Волноводный акустический метода контроля реализован в семей-

стве дефектоскопов АДНШ/АДНКТ (внесены в реестр средств измерения № 34044-13 / № 54084-13) для металлических прутков диаметром Ø15–36 мм и труб НКТ диаметром Ø68–89 мм [7, 8]. В дефектоскопе АДНШ использован отдельный датчик, состоящий из излучателя, реализованного на бесконтактном электромагнитно-акустическом (ЭМА) преобразователе и приемнике, выполненном на пьезоэлектрическом преобразователе [9, 10]. В дефектоскопе АДНКТ использован совмещенный датчик, реализованный на ЭМА-преобразователе с сухим контактом к телу объекта контроля. ЭМА-преобразователи обладают рядом существенных эксплуатационных достоинств, в частности: возможность работы без применения контактных жидкостей; низкий износ; независимость результатов контроля от перекосов преобразователей относительно поверхности объекта и от наличия на поверхности изделия ржавчины, окалины, краски, загрязнений [11–13]. Недостатком ЭМА-преобразователей является низкий коэффициент преобразования [14, 15]. Для преодоления этого недостатка кроме использования

сложных систем выделения информации на фоне помех [16, 17] необходимо увеличивать эффективность возбуждения акустических импульсов [18–20]. Данное направление требует как разработки новых преобразователей [21–23], так и модификации электронной схемы генератора через оптимизацию элементов схемы для лучшей адаптации излучателя к объекту контроля [24–26]. Кроме того, дефектоскоп АДНШ, являясь средством измерения, при расширении области его использования не должен подвергаться изменениям, нарушающим его метрологические характеристики. Цель работы – оценка факторов, влияющих на эффективность работы связки генератор – индуктор, анализ и оценка требований к электронному ключу, расширение области применения метрологически поверенного дефектоскопа АДНШ.

### Используемые подходы при моделировании

При организации участка контроля по волновой методике следует учитывать значительную протяженность объектов контроля. Информационно-измерительная система при этом пространственно сильно растянута, и в силу необходимости прозвучивания объекта контроля с двух сторон удаленность противоположного торца с учетом укладки кабеля с учетом подъемов достигает 15 м. С одной стороны, низкая скважность генерации зондирующих импульсов (период 1 с, одиночный импульс длительностью 20 мкс) позволяет удовлетворить требованиям электробезопасности и реализовать в информационно-измерительной системе низковольтную схему питания генератора с подводимым напряжением менее 20 В; с другой стороны, в генераторе, работающем на ЭМА-излучатель, необходимо получить напряжение не менее 400 В. Таким образом, генератор содержит узел заряда и узел управления ключом (рис. 1, а).

Кроме этого в дефектоскопах АДНШ/АДНКТ в качестве ключевого элемента используется высокочастотный импульсный незапираемый тиристор 2У221А. На текущий момент этот компонент отсутствует на рынке. Выпуск приборов АДНШ/АДНКТ продолжится, пока весь запас тиристоров не будет использован. Статья посвящена анализу и оценке величины и критичности характеристик электронного ключа с целью его замены.

Генератор построен по ключевой схеме и создает зондирующий импульс в излучателе  $L$  за счет энергии, накопленной в конденсаторе  $C$ . Временная диаграмма работы генератора пока-

зана на рис. 1, б. В момент генерации зондирующего импульса узел заряда отключается для снижения влияния на работу измерительной цепи (на рисунке отсутствует).

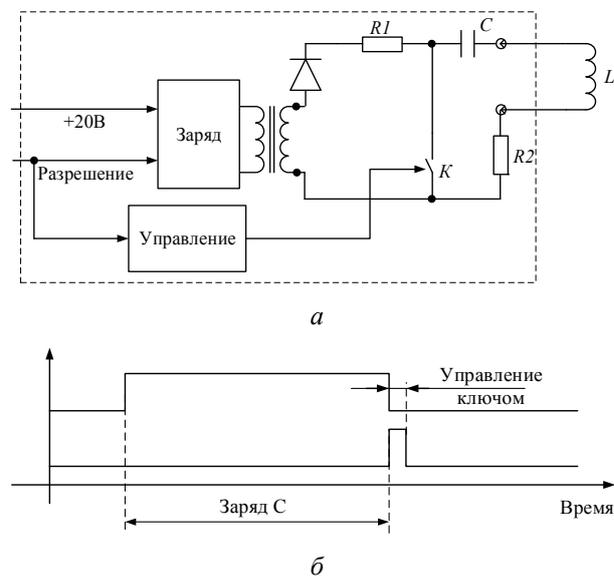


Рис. 1. Структурная схема генератора и временная диаграмма его работы

Частота импульса, возбуждаемого в объекте контроля, определяется как параметрами электрической цепи  $LC$ , так и параметрами механического резонанса. Механический резонанс в системе «излучатель – объект контроля» в условиях малой протяженности индуктора соответствует условию

$$X = \lambda / 4,$$

где  $X$  – расстояние от индуктора до торца прутка;  $\lambda$  – длина волны, возбуждаемой в прутке. При скорости акустической волны  $C_{50} = 5200$  м/с в прутке и рабочей частоте приемного тракта 25 кГц координата  $X$  составляет 52 мм.

Частота колебательной системы излучателя в отличие от рабочей частоты приемного тракта настроена на частоту 50 кГц с целью уменьшения мертвой зоны, т. е. зоны, в которой контроль еще невозможен, в том числе из-за действия зондирующего импульса. Мертвая зона, в свою очередь, определяется величиной РШХ (реверберационно-шумовая характеристика). Значение РШХ определяется как время, за которое амплитуда колебаний после зондирующего импульса упадет ниже уровня браковки. В соответствии с методикой проверки величина браковки определена на уровне 0,5 % от величины сигнала, отраженного от противоположного торца объекта контроля; размер РШХ определен в 600 мкс, что для скорости УЗ-волны

$C_{S0} = 5200$  м/с соответствует мертвой зоне около 1 м (расстояние при движении акустического импульса от излучателя и обратно). Для колебательной системы генератора, образованной компонентами электрической схемы (см. рис. 1, а): ключ  $K$ , конденсатор  $C$ , балластный резистор  $R2$  и излучатель индуктивностью  $L$ , величина РШХ определяется в основном величиной резистора  $R2$  и активным сопротивлением цепи излучателя  $L$ .

Основной характеристикой связки генератор – излучатель, реализованной в виде индуктора, является величина максимального импульсного поля в излучателе. Импульс поля ( $IN$ ) пропорционален произведению тока  $I$  и количества витков индуктора  $N$ . Ограничивающим элементом в схеме является значение максимально допустимого тока в ключе и скорость нарастания тока  $dI/dt$ . К сожалению, рынок ключевых элементов для решения поставленной задачи на текущий момент невелик. Использование «модного» IGBT-транзистора в качестве высоковольтного ключа (более 500 В) ограничено ввиду отсутствия возможности работы с двухполупериодным сигналом, что неминуемо потребует от ключа более высоких параметров: обратное напряжение не менее 1 кВ с рабочим током стока до 100 А. Данному IGBT-транзистору необходим мощный интегральный импульсный драйвер. Такое схемотехническое усложнение оправдано при создании генератора для ЭМА-излучателя с частотами работы 1-5 МГц и максимальным током в цепи 20 А [20–23]. В случае работы на частотах в районе 50 кГц типовым решением является использование импульсного высокочастотного тиристора. Рынок этих устройств растет со скоростью 10-12 % в год [27]. В отличие от IGBT-транзистора управление тиристором не требует существенных энергетических затрат – достаточно малогабаритного импульсного трансформатора. Используемый в данной задаче тиристор 2У221А обеспечивает импульсный ток в открытом состоянии  $I = 100$  А, постоянное напряжение в закрытом состоянии  $U = 500$  В и скорость нарастания тока в открытом состоянии  $dI/dt = 1300$  А/мкс.

Объект контроля, находящийся в центре индуктора излучателя, приводит к нелинейной зависимости индуктивности  $L$  от количества витков индуктора. Значения индуктивности  $L$  на частотах 20 и 50 кГц в зависимости от количества витков (рис. 2) получены с использованием измерителя иммитанса Е7-20. Индуктор намотан медным проводом в изоляции с диаметром жилы 0,49 мм, диаметр намотки  $\varnothing 27$  мм, шири-

на намотки 10 мм, диаметр прутка заготовки штанги из нормализованной стали Ст40 19 мм. Уменьшение индуктивности  $L$  в среднем составило 7 % при изменении частоты с 20 до 50 кГц. Снижение индуктивности  $L$  при уменьшении частоты вызвано электромагнитными свойствами сердечника и межвитковой взаимосвязью, в том числе при изменении количества слоев намотки в индукторе.

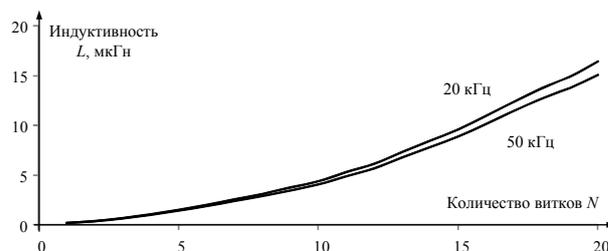


Рис. 2. Зависимость индуктивности  $L$  от количества витков  $N$  индуктора на частотах 20 и 50 кГц

Напряжение на индукторе  $U$  и ток  $I$  в переходном колебательном процессе рассчитывается по формуле [27]

$$U = \frac{E}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\delta t} \cdot \sin\left(\omega_0 t + \arctan\left(\frac{\omega_0}{\delta}\right)\right);$$

$$I = \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 t + \pi),$$

где  $L$  – индуктивность индуктора;  $C$  – емкость частотозадающего конденсатора;  $R$  – суммарное омическое сопротивление всех цепей, участвующих в работе, в том числе соединяющих индуктор с элементами схемы;  $\delta = \frac{R}{2L}$  – коэффициент затухания системы;  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$  – циклическая частота колебательного процесса.

Активное сопротивление индуктора  $R$  определяется количеством витков и рассчитывается исходя из сопротивления медной жилы  $\varnothing 0,49$  мм – 0,093 Ом/м и диаметра оправки. Сопротивление подводющего кабеля 1,5 м с медной жилой площадью сечения 0,5 или 0,32 мм<sup>2</sup> составляет около 0,107 и 0,165 Ом соответственно. Сопротивление открытого ключа 0,035 Ом. Таким образом, минимальное схемное значение активного сопротивления в системе с проводом 0,32 мм<sup>2</sup> составит  $R_{\min} = 143 + 7,9N$  мОм, где  $N$  – количество витков. Исходя из требований длительности РШХ ( $T_{RHX}$ ) для переходного колебательного процесса необходимо рассчитать мини-

мальное сопротивление  $R_{RHX}$  для индуктора с  $N$  витками:  $R_{RHX} = -\ln(U_{RHX}) \cdot \frac{2L_N}{T_{RHX}}$ , где  $L_N$  – индуктивность индуктора с  $N$  витками.

### Результаты и обсуждение

Анализ сигналов на компонентах колебательной системы проведен их моделирование в программной среде Mathcad. Моделирование проведено с использованием решения задачи о математическом описании колебательного контура на временной в 10000 точек с шагом по времени 0,1 мкс. Расчет произведен в спектральной области с оценкой пиковых значений тока в системе и получаемой РШХ. В начальный момент времени (ключ замкнут) напряжение на индукторе соответствует напряжению на конденсаторе  $E = 350$  В, частота резонанса 50 кГц. Для оценки влияния активного сопротивления  $R_{RHX}$  колебательной системы на затухание зададимся значениями РШХ  $T_{RHX} = 400$  мкс и уровнем определения РШХ = 0,1 %.

На рис. 3 приведены значения  $R$  активного сопротивления в колебательной системе при сечениях медной жилы 0,5, 0,32 мм<sup>2</sup> и для сечений медной жилы 0,32 мм<sup>2</sup> при наличии балластного сопротивления 0,1 Ом (подводящий провод не учитывается (отсутствует)). Кривая  $R_{RHX}$  показывает минимальное сопротивление, рассчитанное из требований длительности РШХ. Таким образом, для удовлетворения требованию минимизации РШХ в случае 14 и более витков сопротивление  $R$  в системе необходимо увеличивать.

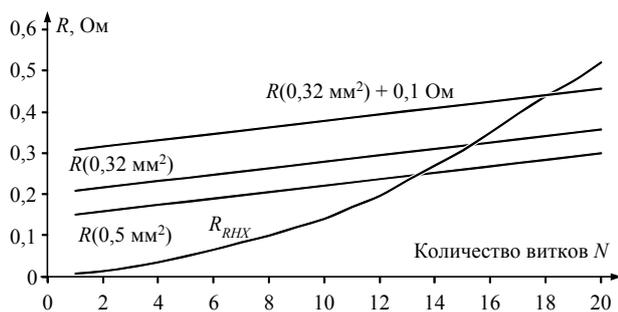


Рис. 3. Значения активного сопротивления в колебательной системе для разных диаметров намоточных проводов и при различном количестве витков в излучателе: ( $R(0,32 \text{ мм}^2) - 0,165$  Ом,  $R(0,5 \text{ мм}^2) - 0,107$  Ом,  $R(0,32 \text{ мм}^2) + 0,1 - 0,265$  Ом)

АЧХ генератора при работе с разным количеством витков излучателя показано на рис. 4. АЧХ получено по результатам моделирования сигналов на компонентах колебательной системы в программной среде Mathcad. Расчет про-

веден для резонансной частоты  $f = 50$  кГц,  $R = 0,1$  Ом. При одном витке излучателя система вырождается и теряет резонансные свойства. При увеличении количества витков амплитуда сигналов падает, и, начиная с 7 витков, максимум спектра существенно не отличается от расчетной частоты резонанса системы. Увеличение активного сопротивления  $R$  в системе генератора, вызванное наличием кабеля или изменением балансного резистора  $R$  (см. рис. 5), приводит к уменьшению амплитуды сигналов и снижению добротности.

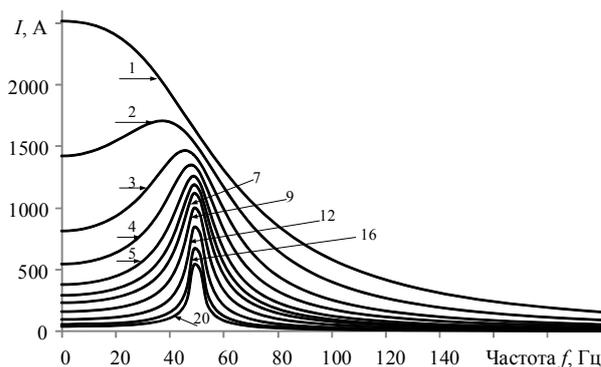


Рис. 4. АЧХ системы при количестве витков индуктора  $N$  от 1 до 20

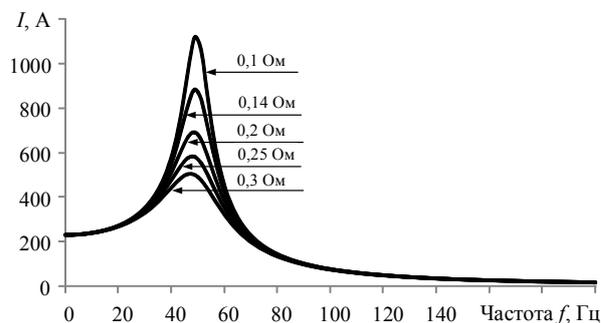


Рис. 5. АЧХ системы с 7 витками излучателя при различной величине балластного сопротивления

Результаты расчетов значений импульсов поля  $IN$  в системе «генератор – излучатель» при различном количестве витков излучателя представлены на графиках рис. 6. Левая шкала показывает максимальный импульсный ток в системе, правая – максимальное значение импульса поля  $IN$ . Максимальный импульсный ток в системе с увеличением количества витков падает. При незначительном количестве витков значение поля  $IN$  увеличивается с ростом количества витков  $N$  и, достигнув максимума, начинает медленно снижаться. Снижение поля  $IN$  обусловлено как увеличением индуктивности излучателя, приводящее к падению тока, так и снижением объема энергии, накопленной

конденсатором, настроенным в резонанс с индуктивностью излучателя. Изменение активного сопротивления системы  $R$  приводит как к существенному снижению максимума поля  $IN$ , так и смещению максимума в сторону большего количества витков излучателя. Большому сопротивлению соответствует более широкая зона активных сопротивлений соответствующая максимальному полю.

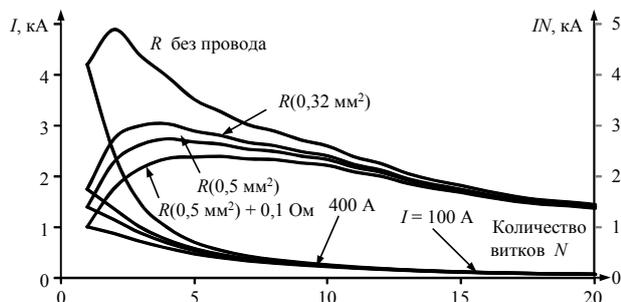


Рис. 6. Максимальные токи и значение произведения тока на количество витков  $IN$  в зависимости от количества витков индуктора

Следует отметить, что на систему накладывается ограничение по максимальному току  $I$ , проходящему через ключ. Например, для ключа 2У221А паспортное значение максимального импульсного тока составляет 100 А. Таким образом, при  $N = 7$  виткам излучателя с проводом медной жилой площадью сечения  $0,5 \text{ мм}^2$  и ограничивающим резистором в  $0,1 \text{ Ом}$  система переводит ключ в недеклаируемый режим работы, что может приводить к возникновению неисправностей. Тиристор 2У222 с импульсным

током в открытом состоянии 400 А является более предпочтительным. К недостаткам тиристора 2У222 следует отнести его значительный размер  $\text{Ø}54 \times 14 \text{ мм}$ . Перспективным можно считать применение новых разработок триодов фирмы IXYS (например, МСС 310 – 08 имеет разрешенный режим работы 9,2 кА при напряжении 800 В) [28].

Предложенная методика расчета не учитывает внутреннее сопротивление конденсатора и наличие в системе сердечника (объекта контроля) с нелинейностью и возможностью его насыщения.

На основании изложенной методики разработан адаптер для дефектоскопа АДНШ, подключаемый к выходу генератора и входу приемника, позволяющий использовать пьезопреобразователь в совмещенном режиме. Это расширило область применения дефектоскопа на композитную арматуру. В отличие от металлических прутков при работе с композитной арматурой использование ЭМА-излучателя невозможно. Разработка и внесение в реестр средств измерений прибора, специально адаптированного к работе с композитной арматурой, – дорогой и длительный процесс. В качестве частотно задающего элемента  $L$  в системе использована воздушная катушка с 16 витками. Эхограмма, полученная на прутке композитной арматуры (рис. 7) показывает принципиальную возможность использования волноводного метода контроля для целей структуроскопии и дефектоскопии. Полученное значение РШХ составило около 500 мкс (соответствует 1,2 м).

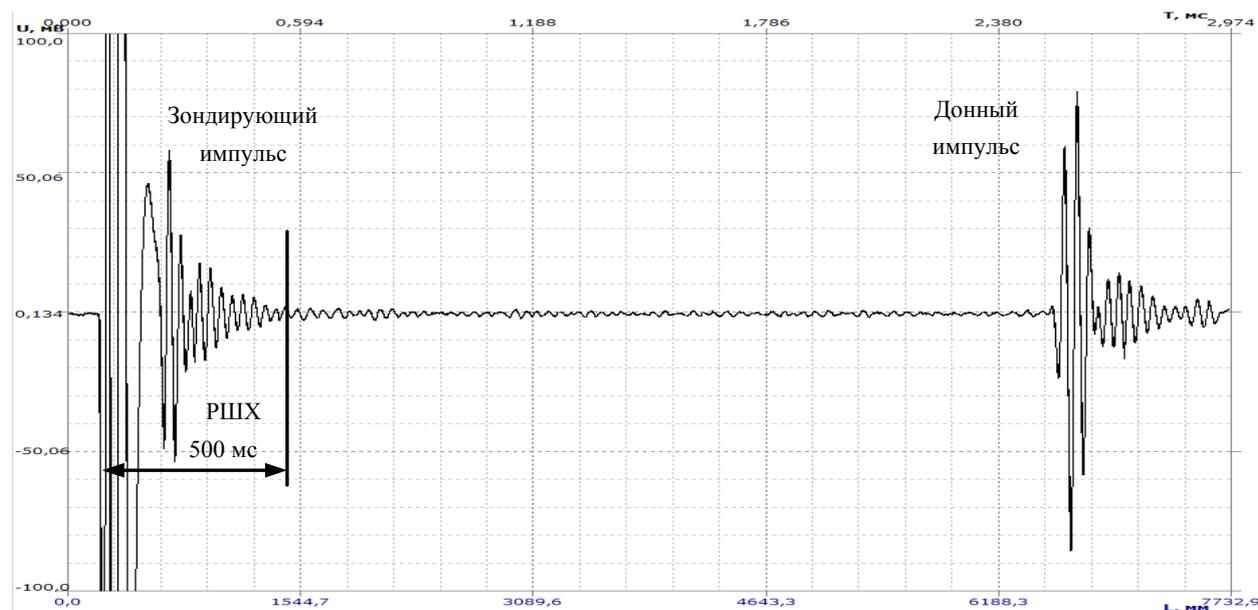


Рис. 7. Эхограмма прозвучивания композитной арматуры

### Выводы

1. Оценены компоненты зондирующего генератора ударного импульса для ЭМА-излучателя в информационной системе, реализующей волноводную методику контроля протяженных объектов, работающего на частоте 50 кГц. Питание 24 В, период 1 с, длительность импульса 20 мкс, напряжение 400 В, ток более 100 А.

2. Получено значение внутреннего активного сопротивления в системе «генератор – индуктор» в зависимости от количества витков индуктора достаточного для получения заданного значения РШХ (не более 400 мкс). При количестве витков индуктора более 14 необходим балластный резистор.

3. Проведен анализ системы возбуждения ЭМА-излучателя с целью получения максимального импульсного поля, в зависимости от величины активного сопротивления в системе. Создаваемое поле имеет максимум при разном количестве витков излучателя: 3-4 витка при  $R = 0,165$  Ом, 4 витка при  $R = 0,107$  Ом, 6 витков при  $R = 0,265$  Ом. Большему сопротивлению соответствует более широкая зона активных сопротивлений, соответствующая максимальному полю.

### Библиографические ссылки

1. *Муравьева О. В., Муравьев В. В., Стрижак В. А.* Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов. Новосибирск : СО РАН, 2017. 234 с.
2. Эффективность использования стержневых и крутильных волн для контроля пруткового проката / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, Т. Н. Лебедева // Дефектоскопия. 2004. № 3. С. 3–8.
3. *Муравьева О. В., Злобин Д. В.* Акустический тракт метода многократных отражений при дефектоскопии линейно-протяженных объектов // Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 43–51.
4. *Муравьева О. В., Стрижак В. А., Злобин Д. В.* Технология акустического волноводного контроля насосно-компрессорных труб // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 4(66). С. 55–60.
5. *Муравьева О. В., Стрижак В. А., Злобин Д. В.* Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования // Нефтяное хозяйство. 2016. № 9. С. 110–115.
6. *Буденков Г. А., Недзвецкая О. В., Злобин Д. В.* Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами труб // Дефектоскопия. 2006. № 6. С. 58–66.
7. *Муравьева О. В., Мурашов С. А.* Использование крутильных волн при выявлении эксплуатационных дефектов насосных штанг и насосно-компрессорных труб // Вестник ИжГТУ. 2011. № 2. С. 149–154.
8. *Муравьева О. В., Муравьев В. В., Стрижак В. А.* Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пру-

жин // В мире неразрушающего контроля. 2013. Т. 59, № 1. С. 52–60.

9. *Муравьева О. В., Леньков С. В., Муравьев В. В.* Факторы, влияющие на эффективность возбуждения крутильных волн при волноводном контроле труб // Дефектоскопия. 2016. № 2. С. 33–41.

10. *Муравьева О. В., Леньков С. В., Мурашов С. А.* Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов // Акустический журнал. 2016. № 1. С. 117–124.

11. *Муравьев В. В., Муравьева О. В., Стрижак В. А.* Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 3–12.

12. *Муравьев В. В., Муравьева О. В., Кокорина Е. Н.* Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 66–70.

13. *Муравьева О. В., Мышкин А. В.* Моделирование акустических полей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей // Дефектоскопия. 2013. № 12. С. 69–76.

14. *Муравьева О. В., Петров К. В., Соков М. Ю.* Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 17–23.

15. *Ремезов В. Б.* Графическое представление сквозного электромагнитно-акустического преобразования // Дефектоскопия. 2012. № 5. С. 3–14.

16. *Леньков С. В.* Определение частоты дискретизации и длительности реализации при цифровом спектральном анализе конечных реализаций сигналов // Вестник ИжГТУ. 2006. № 1. С. 49–52.

17. *Стрижак В. А., Пряхин А. В., Обухов С. А.* Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1. С. 243–250.

18. *Муравьева О. В., Мышкин А. В.* Оценка влияния конструктивных особенностей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей на формирование диаграмм направленности // Дефектоскопия. 2014. № 1. С. 47–54.

19. *Матвиенко А. Ф., Корзунин Г. С., Лоскутов В. Е.* Опыт контроля состояния труб магистральных газопроводов электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 28–37.

20. *Бабкин С. Э., Ильясов Р. С.* О возможности использования параметров ЭМАП для оценки предела упругости и остаточных деформаций ферромагнитных материалов // Дефектоскопия. 2010. № 1. С. 83–90.

21. *Михайлов А. В., Гобов Ю. Л., Смородинский Я. Г.* Электромагнитно-акустический преобразователь с им-

пульсным подмагничиванием // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 14–23.

22. Сучков Г. М., Донченко А. В. Реальная чувствительность ЭМА-приборов // Дефектоскопия. 2007. № 6. С. 43–50.

23. Сучков Г. М., Донченко А. В., Десятниченко А. В. Повышение чувствительности ЭМА-приборов // Дефектоскопия. 2008. № 2. С. 15–20.

24. Сучков Г. М., Тараненко Ю. К., Хомяк Ю. В. Бесконтактный многофункциональный ультразвуковой преобразователь для измерений и неразрушающего контроля // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 56–58.

25. Муравьев В. В., Муравьева О. В., Стрижак В. А. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2011. № 8. С. 16–28.

26. Злобин Д. В., Муравьева О. В. Особенности построения аппаратуры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн // Вестник ИжГТУ. 2012. № 4. С. 99–104.

27. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники // Электрические цепи. М.: Гардарики, 2002. 638 с.

28. Как технологические инновации способны дать новую жизнь тиристорам в XXI веке / Б. Грин, Х. Остманн, Й. ван Зееланд, И. Полянский // Силовая электроника. 2013. № 6. С. 20–22.

### References

1. Murav'eva O. V., Murav'ev V. V., Strizhak V. A. (2017). *Akusticheskii volnovodnyi kontrol' lineinoprotiyazhennykh ob'ektov* [Acoustic waveguide control of linearly extended objects], Novosibirsk: SB RAS (in Russ.).

2. Budenkov G. A., Nedzvetskaya O. V., Zlobin D. V. (2004). The application efficiency of rod and torsional waves for checking rod-shaped roll stock. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 40, no. 3, pp. 147-151 (in Russ.).

3. Murav'eva O. V., Zlobin D. V. (2013). The acoustic path in the method of multiple reflections during nondestructive testing of linearly extended objects. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 49, no. 2, pp. 93-99 (in Russ.).

4. Murav'eva O. V., Strizhak V. A., Zlobin D. V. (2014). Technology of acoustic waveguide control of tubing. *Defektoskopiya* [Technology of Acoustic Waveguide Inspection of Pumping and Compression Pipes], vol. 66, no. 4, pp. 55-60 (in Russ.).

5. Murav'eva O. V., Strizhak V. A., Zlobin D. V. (2016). Acoustic waveguide control of elements of deep pumping equipment. *Neftyanoe khozyaistvo* [Neftyanoe khozyaistvo], no. 9, pp. 110-115 (in Russ.).

6. Budenkov G. A., Nedzvetskaya O. V., Zlobin D. V. (2006). Interaction of torsion waves with longitudinal cracks in tubes. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 42, no. 6, pp. 392-397 (in Russ.).

7. Murav'eva O. V., Murashov S. A. (2011). Use of torsional waves in detecting operational defects of pumping rods and tubing. *Vestnik IzhGTU* [Bulletin IzhSTU], no. 2, pp. 149-154 (in Russ.).

8. Murav'eva O. V., Murav'ev V. V., Strizhak V. A. (2013). The real sensitivity of the input acoustic control of rod-billet in the production of springs. *Defektoskopiya* [In the world of nondestructive testing], vol. 59, no. 1, pp. 52-60 (in Russ.).

9. Murav'eva O. V., Len'kov S. V., Murav'ev V. V. (2016). Factors that affect the excitation effectiveness of torsional waves during waveguide inspection of pipes. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 2, pp. 33-41 (in Russ.).

10. Murav'eva O. V., Len'kov S. V., Murashov S. A. (2016). Torsional waves excited by electromagnetic-acoustic transducers with acoustic waveguide control of pipelines. *Akusticheskii zhurnal* [Acoustical Physics], no. 1, pp. 117-124 (in Russ.). <http://doi:10.7868/S032079191506009X>

11. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Strizhak V. A. (2014). Analysis of the comparative reliability of acoustic methods for controlling rod stock from spring-spring steels. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 50, no. 8, pp. 435-442 (in Russ.).

12. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Kokorina E. N. (2013). Acoustic Structuroscopy and Flaw Detection of Rods of 60C2A Steel in the Production of Springs with a Nanoscale Structure. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Ferrous metallurgy* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy], no. 4, pp. 66-70 (in Russ.).

13. Murav'eva O. V., Myshkin A. V. (2013). Simulation of acoustic fields of synphase electromagnetic-acoustic transducers. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 49, no. 12, pp. 728-734 (in Russ.).

14. Murav'eva O. V., Petrov K. V., Sokov M. Yu. (2015). The simulation and study of the propagation of the acoustic waves that are radiated by an electromagnetic-acoustic trough-type transducer over the elliptic cross-section of a bar. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 51, no. 7, pp. 400-406 (in Russ.).

15. Remezov V. B. (2012). A graphic representation of through electromagnetic-acoustic transformations. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 48, no. 5, pp. 259-267 (in Russ.).

16. Lenkov S. V. (2006). Determination of sampling frequency and duration of realization in digital spectral analysis of final signal realizations. *Vestnik IzhSTU* [Bulletin IzhSTU], no. 1, pp. 49-52 (in Russ.).

17. Strizhak V. A., Pryaxin A. V., Obuxov S. A. (2011). The information and measuring system for excitation, detection, registration and processing of signals from electromagnetic-acoustic transducers. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no. 1, pp. 243-250 (in Russ.).

18. Murav'eva O. V., Myshkin A. V. (2014). An evaluation of the influence of the design features of synphased electromagnetic-acoustic transducers on the for-

mation of directivity characteristics. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 50, no. 1, pp. 38-44 (in Russ.).

19. Matvienko A. F., Korzunin G. S., Loskutov V. E. (2015). Experience in monitoring the state of trunk gas pipelines by electromagnetic-acoustic method. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 9, pp. 28-37 (in Russ.).

20. Babkin S. E., Il'yasov R. S. (2010). On the possibility of estimating the elasticity limit and residual deformations in ferromagnetic metals using the parameters of electromagnetic-acoustic transformation. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 46, no. 1, pp. 64-48 (in Russ.).

21. Mikhailov A. V., Gobov Y. L., Smorodinskii Y. G. (2015). An electromagnetic-acoustic transducer with pulsed biasing. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 51, no. 8, pp. 467-475 (in Russ.).

22. Suchkov G. M., Donchenko A. V. (2007). Real sensitivity of EMA instruments. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], no. 6, pp. 43-50 (in Russ.).

23. Suchkov G. M., Donchenko A. V., Desyatnichenko A. V. (2008). Increasing the sensitivity of

EMA devices. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 44, no. 2, pp. 56-90 (in Russ.).

24. Suchkov G. M., Khomyak Y. V., Taranenko Y. K. (2016). A Non-Contact Multifunctional Ultrasonic Transducer for Measurements and Non-Destructive Testing. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technology], no. 9, pp. 990-993 (in Russ.).

25. Muravyev V. V., Muravyeva O. V., Strizhak V. A. (2011). Evaluation of residual stresses in rims of wagon wheels using the electromagnetic-acoustic method. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], vol. 47, no. 8, pp. 512-521 (in Russ.).

26. Zlobin D. V., Murav'eva O. V. (2012). Development Features of Electromagnetic Acoustic Defectoscopy Equipment for Bar Iron Using Rod Waves. *Vestnik IzhGTU* [Bulletin IzhSTU], no. 4, pp. 99-104 (in Russ.).

27. Bessonov L. A. (2002). *Teoreticheskie osnovy' e'lektrotexniki. E'lektricheskie cepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow: *Gardariki* (in Russ.).

28. Grin B., Ostmann X., van Zeeland J., Polyanskij I. (2013). How technological innovations can bring a new life to thyristors in the 21st century. *Silovaya e'lektronika* [Power Electronics], no. 6, pp. 20-22 (in Russ.).

### Features of Excitation of an Electromagnetic Acoustic Transducer under a Waveguide Method of Testing

V. A. Strizhak, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

R. R. Hasanov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A. V. Pryakhin, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*Widely spreading waveguide techniques for non-destructive testing of extensional objects, including the application of electromagnetic-acoustic technologies in the changing market of electronic components require the search for new approaches to the design of electronic equipment. Circuitry solutions that are necessary for constructing a probe pulse generator in the measuring and information system that implements the waveguide technique for non-destructive testing of extensional objects were considered. The operational requirements for the device are determined and the necessary characteristics of the components of the pulse generator that affect its behavior in the formation of a shock pulse for the EMA transducer are estimated. The criterion for estimating the work of the shock pulse generator in the form of the reverberation-noise characteristic duration is obtained. Frequency analysis of the excitation system of the emitter of the radiator is carried out depending on the number of turns of the radiator and the magnitude of the active resistance in the system. Frequency analysis of the excitation system of the emitter of the EMA transducer depending on the number of turns in the transducer and the magnitude of the active resistance in the system was done. The maximum pulse field in the EMA emitter is estimated and the optimum number of turns is determined for it. The maximum pulse field in the EMA emitter was estimated and the optimum number of turns was determined.*

*Based on the evaluation of the EMA emitter and generator characteristics an electric adapter for the ADNH flaw detector, connected to the generator output and to the receiver input, which allows using a piezo transducer in a combined mode was developed. The device was tested on the rods of composite reinforcement. The obtained value of the RNC was about 500  $\mu$ s (corresponding to 1.2 m).*

**Keywords:** guided wave testing, electromagnetic acoustic transducer, generator for electromagnetic acoustic transducer, inductor.

Получено 07.05.2018