

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

© 2020 г. Е.Л. Ноздрачева^{1,*}, А.Ю. Слободчук^{1,**}, Г.М. Сучков^{1,***}
Р.П. Мигущенко^{1,****}, О.Ю. Кропачек^{1,*****}

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина 61002
Харьков, ул. Кирпичева, 2

E-mail: *nozdrachova@gmail.com; **antonslobodchuk@gmail.com;
hpi.suchkov@gmail.com; *mrp1@ukr.net; *****kropachek@ukr.net

Поступила в редакцию 28.11.2019; после доработки 21.01.2020
Принята к публикации 31.01.2020

На основе анализа информационных источников определены требования к конструкциям генераторов высокочастотных пакетных радиоимпульсов высокого напряжения для питания преобразователей емкостного типа. Разработан вариант схмотехнического решения генератора для питания емкостных преобразователей. Новый генератор позволяет создавать импульсные пиковые напряжения в малоемкостных преобразователях более 1 кВ с частотами до 5 МГц с длительностью 1—10 периодов частоты заполнения и частотами зондирования до 1 кГц. Экспериментально показано, что с помощью макета нового генератора получены амплитуды импульсов, прошедших стальной образец толщиной 20 мм, отношение которых к амплитуде шума, принятых миниатюрным пьезоэлектрическим преобразователем, составляет 15,5 раз. Использование разработанного мощного усилителя импульсов напряжения позволит создавать и усовершенствовать приборы для ультразвукового контроля качества металлоизделий, измерений и диагностики преобразователями емкостного типа.

Ключевые слова: контроль качества, измерения, диагностика, преобразователь емкостного типа, схмотехника, генератор радиосигналов напряжения, длительность импульса, частота.

DOI: 10.31857/S0130308220030045

ВВЕДЕНИЕ

В промышленности все более широкое применение находят бесконтактные методы измерений, контроля и диагностики [1]: воздушный, электромагнитно-акустический, емкостной. Среди них наиболее распространенным в применении является электромагнитно-акустический [1—2]. Несмотря на очевидные преимущества, у него есть существенные недостатки — сильное притяжение к ферромагнитному объекту контроля (ОК), налипание окалины на преобразователь, сложная аппаратура питания преобразователей [3]. Воздушный метод возбуждения и приема ультразвуковых импульсов применим только для низкочастотных импульсов [4—6]. Емкостной метод возбуждения и приема ультразвуковых импульсов прост в реализации, позволяет возбуждать ультразвуковые импульсы в широком диапазоне частот, не притягивается к ОК, на его работу не влияет наличие окалины, но его чувствительность традиционно считается низкой [1]. Поэтому емкостной метод применяется исключительно в лабораторных условиях в высокоточной аппаратуре для определения параметров импульсов ультразвуковых колебаний [7—10].

Суть работы преобразователя емкостного типа (ПЕТ), с учетом факторов влияющих на возбуждение высокочастотных ультразвуковых импульсов, поясняется рис. 1 [1, 11—13].

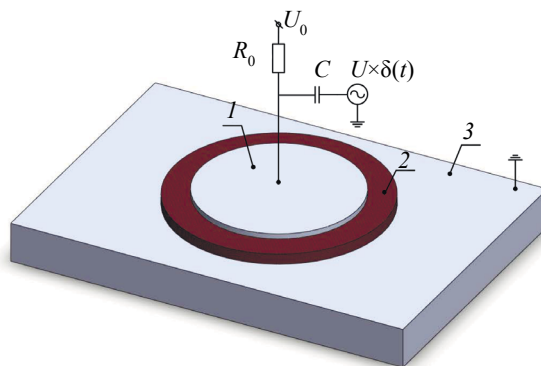


Рис. 1. Упрощенная схема преобразователя емкостного типа:
1 — электропроводящий круглый диск; 2 — диэлектрический слой; 3 — электропроводящее изделие; U_0 — постоянное напряжение;
 C — конденсатор; R_0 — ограничительный резистор; $U \times \delta(t)$ — короткий однополярный импульс напряжения.

В традиционном представлении [1, 11—16] во время работы ПЕТ к диску 1 через высокоомный резистор R_0 прикладывается напряжение U_0 . В результате на поверхностный слой ОК 3 действует постоянное электрическое поле. К этому же диску 1 через конденсатор C подается короткий однополярный импульс напряжения $U \times \delta(t)$, это приводит к действию на поверхностный слой ОК 3 импульсного электрического поля. Совместное действие созданных постоянного и импульсного электромагнитных полей на поверхностный слой ОК 3 возбуждает импульсы продольных ультразвуковых колебаний, которые распространяются в объем электропроводного изделия 3. Диэлектрический слой 2 предохраняет устройство от электрического пробоя. Следует отметить низкую чувствительность такого способа возбуждения ультразвуковых импульсов [1].

Авторы работ [14, 15] при теоретических расчетах (применили непрерывное переменное напряжение $U \times e^{i\omega t}$) показали, что при отсутствии поляризующего постоянного напряжения происходит удвоение частоты возбуждаемых ультразвуковых импульсов [14]. При использовании поляризующего постоянного напряжения возбуждаются две частоты ω и 2ω [14, 15]. Согласно этим работам, механическое высокочастотное давление P_0 , созданное ПЕТ, можно определить из выражения

$$P_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2}(U_0 \sin \omega t + U_-)^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2}(2U_0U_- \sin \omega t - U_0^2 \sin^2 \omega t) + \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2}(U_0^2 + U_-^2), \quad (1)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 — диэлектрическая постоянная; d — расстояние между обкладками ПЕТ; U_- — постоянное поляризующее напряжение; U_0 — максимальное значение переменного напряжения; ω — круговая частота.

При этом автор статьи [14] делает вывод: «Характерной особенностью полученных выражений является то, что амплитуда возбуждающего давления P_0 по сути не зависит ни от формы, ни от площади электрода. Увеличение амплитуды давления, а, следовательно, и амплитуды акустических колебаний, можно осуществить путем увеличения амплитуды переменного и поляризующего напряжений, подбора соответствующего материала с высокой диэлектрической проницаемостью в качестве прослойки между электродом и поверхностью ОК, или уменьшения расстояния d между обкладками конденсатора». В [14] приводится выражение для смещения точек поверхности ОК U_z , создаваемых ПЕТ:

$$U_z(M_2) = -\frac{P_0 \sin \omega t}{4\pi K_0} \int_0^r \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sin\left(\frac{\omega}{c} R \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \varphi}\right)}{\left(\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \varphi}\right)} - \frac{1 - \cos\left(\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \varphi}\right)}{\left(\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \varphi}\right)} \right) \frac{dr}{r \sqrt{1 - \frac{2x_0}{r} \cos^2 \varphi}} d\varphi, \quad (2)$$

где R — радиус датчика; c — скорость распространения звука в объекте контроля; r — радиус емкостного преобразователя; φ — сферическая координата; M_2 — точка наблюдения с координатами $M_2(x_0, 0, 0)$; K_0 — коэффициент, характеризующий материал образца, выражается через параметры, определяющие свойства материала:

$$K_0 = \left(2 + \frac{2\mu}{1 - 2\mu} \right) G, \quad (3)$$

где G — модуль сдвига; μ — коэффициент Пуассона.

На основании этих расчетов автор делает вывод о зависимости возбуждаемых смещений от формы и геометрических размеров и давления P_0 , создаваемого ПЕТ.

Из изложенного следует, что основными технологическими факторами, определяющими интенсивность возбуждаемых ультразвуковых колебаний, являются постоянное поляризующее электрическое поле и импульсное электрическое поле. С учетом результатов работ [11—14], высокочастотные импульсы напряжения должны иметь вид пакета заданной длительности с узкой частотной полосой. Для исключения влияния поляризации диэлектрической прокладки между ОК и электродом ПЕТ на амплитуду ультразвуковых импульсов поляризующее электрическое поле

необходимо формировать в виде импульса прямоугольной формы заданной длительности [11, 14], определяемой толщиной ОК. Поляризующее и импульсное напряжения должны иметь одинаковые максимальные значения.

Из анализа рассмотренных информационных источников [1—17] наиболее сложным устройством для обеспечения работы ПЕТ является генератор высокочастотных пакетных импульсов [17]. Однако в информационных источниках не приводятся требования к формированию импульсов, построению генераторов, схемотехнические решения, а также примеры их реализации, которые могут повысить чувствительность ПЕТ. Поэтому настоящая публикация является актуальной.

Цель работы — разработка электронной схемы мощного усилителя пакетных импульсов напряжения с изменяющимися параметрами для питания преобразователей емкостного типа.

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ известных литературных источников [1—2, 11, 14, 17] позволил сформулировать требования к параметрам генератора высокочастотных импульсов (ГВИ), который должен обеспечивать питание ПЕТ, например, в наиболее часто используемом для контроля и измерений частотном диапазоне. Он должен формировать в ПЕТ, с бесконечным сопротивлением постоянному току, пакетные импульсы напряжения с частотой заполнения от 1 до 5 МГц. Количество периодов частоты заполнения импульса должно быть регулируемым в диапазоне 1—10 шт. Максимальная пиковая амплитуда напряжения на преобразователе емкостного типа должна быть не менее 1 кВ. Частоту следования зондирующих импульсов необходимо регулировать в интервале от 10 Гц до 1 кГц в зависимости от скорости сканирования ОК.

Авторы данной статьи (на основании анализа характеристик элементов силовой электроники) пришли к выводу о целесообразности применения в выходных каскадах широкополосных симметричных трансформаторов, включенных параллельно, а затем последовательно для достижения коэффициента трансформации, равным 3. Были выполнены экспериментальные исследования возможностей ряда повышающих трансформаторов на основе сердечников из феррита. Установлено, что они не позволяют формировать выходной сигнал требуемого частотного диапазона. В то же время было показано, что в заявленном частотном диапазоне некоторые модели MOSFET транзисторов в двухтактных схемах включения переключаются с достаточными временными промежутками.

Для реализации разработанного технического решения предложено формировать выходной импульс генератора высоковольтных импульсов в виде меандра, который преобразуется в синусоиду за счет емкостных составляющих подводящего коаксиального кабеля и самого ПЕТ. Такой подход дает возможность упростить высоковольтную часть генератора, особенно на высоких частотах зондирования, и получать в нагрузке значительные амплитуды возбуждаемого напряжения. Экспериментально установлена целесообразность применения параллельного включения до 3 шт. широкополосных симметричных трансформаторов в мостовом включении, что позволяет увеличить напряжение за счет применения высокочастотных широкополосных симметричных трансформаторов. Полевые MOSFET транзисторы должны выдерживать импульсный ток до 100 А, а также иметь затвор и относительно небольшую емкость «исток-затвор» для быстрой работы в мостовом включении.

Установлена целесообразность изготавливать ГВИ в виде трех основных блоков: формирователя сигналов с регулируемыми параметрами, гальванической оптической развязкой и высокочастотного широкополосного усилителя мощности.

На основе сформированного подхода разработан ГВИ, который позволяет выполнить требования, необходимые для питания ПЕТ современных средств контроля, измерения и диагностики. В качестве примера такой разработки на рис. 2 приведена блок-схема формирователя ГВИ.

Формирователь сигналов 1 с регулируемыми параметрами выполнен на микро-

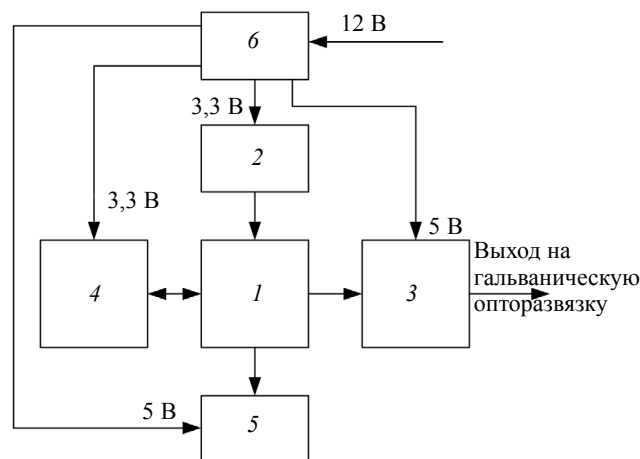


Рис. 2. Блок-схема формирователя ГВИ:
1 — формирователь сигналов; 2 — орган управления (кнопки);
3 — буферный логический элемент; 4 — память EEPROM;
5 — ЖК дисплей; 6 — стабилизаторы питания.

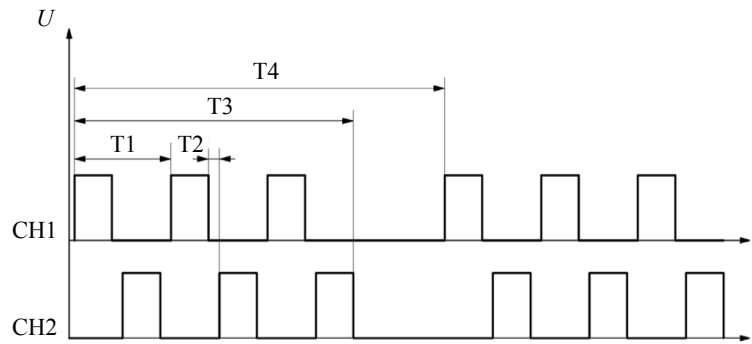


Рис. 3. Временная диаграмма выходных сигналов блока формирователя: T1 — период последовательности прямоугольных импульсов; T2 — «мертвое» время, необходимое для исключения одновременного открывания транзисторов двухтактного каскада; T3 — длительность пакета импульсов; T4 — период следования пакета импульсов.

контроллере типа STM32, который формирует две последовательности прямоугольных импульсов амплитудой 3,3 В со скважностью, равной 2 (меандр), и противоположных по фазе, что необходимо для питания последующих каскадов ГВИ. Управление частотой, скважностью и количеством импульсов осуществляется посредством кнопок 2. Временные диаграммы выходных сигналов блока формирователя показаны на рис. 3.

Каждый из двух сигналов с выхода микроконтроллера 1 поступает на входы буферного повторителя 3. Буферный повторитель используется для усиления выходного сигнала по напряжению до уровня 5 В (уровень логической «1» на выходе из генератора) а также для обеспечения крутых фронтов, сформированных прямоугольных последовательностей импульсов. Сохранение настроек генератора осуществляется в энергонезависимую память 4.

Для защиты микроконтроллера 1 от радиопомех, наводящихся по линиям выхода буфера 3, применено устройство гальванической развязки, блок-схема которого изображена на рис. 4.

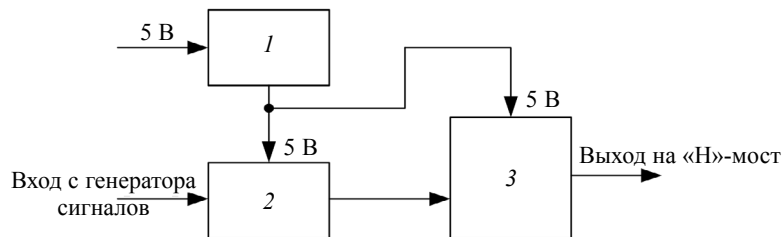


Рис. 4. Блок-схема модуля гальванической опторазвязки ГВИ: 1 — DC/DC преобразователь; 2 — оптопара; 3 — буферный логический элемент.

«Мертвое время» необходимо для предотвращения протекания сквозных токов через транзисторные ключи каждого из полумостов.

Отображение текущих параметров осуществляется на жидкокристаллическом индикаторе 5. Стабилизаторы питания 6 применены линейные.

Модуль гальванической опторазвязки состоит из DC/DC преобразователя 1, оптопары 2 и буферных повторителей 3. Выходы буферных повторителей 3 подключены к схеме мостового усилителя мощности. Мостовой усилитель мощности состоит из двух одинаковых полумостов. Каждый из полумостов состоит из драйвера нижнего и верхнего ключей, который управляет затворами двух MOSFET транзисторов нижнего и верхнего плеча. Выход каждого полумоста подключается к каждому выводу входа широкополосного симметричного трансформатора. «Н»-мостом формируется переменное разнополярное напряжение, прикладываемое к первичной обмотке широкополосного симметрирующего трансформатора.

Симметричный широкополосный трансформатор изображен на рис. 5. Он состоит из трех ферритовых колец, (размерами K20×12×6) и имеет по семь витков коаксиального кабеля RG59 с волновым сопротивлением 75 Ом. Каждый из трансформаторов является согласующим, то есть имеет волновое сопротивление по 75 Ом по входу и выходу. Входы всех трех трансформаторов включены параллельно, а выходы — последовательно. Это означает, что входное волновое сопротивление по-

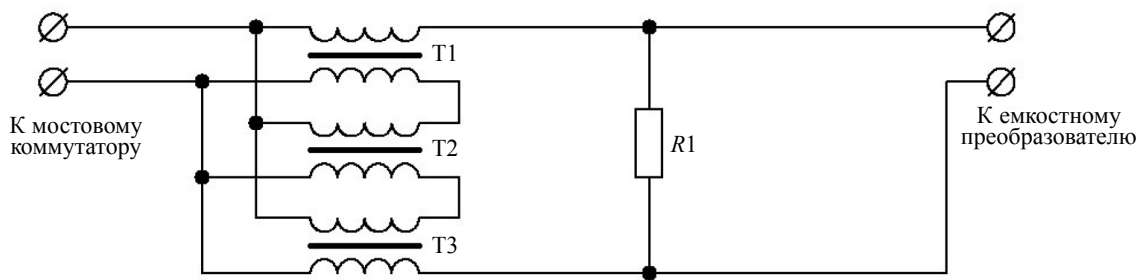


Рис. 5. Схема симметричного повышающего широкополосного трансформатора.

лучившегося симметричного широкополосного трансформатора составляет 25 Ом, то есть в 3 раза меньше волнового сопротивления коаксиального кабеля. Для того, чтобы работа трансформатора была согласованной, выход трансформаторной сборки необходимо нагрузить на сопротивление, равное трехкратному сопротивлению коаксиального кабеля, то есть 225 Ом.

Блоки питания на схемах не указаны.

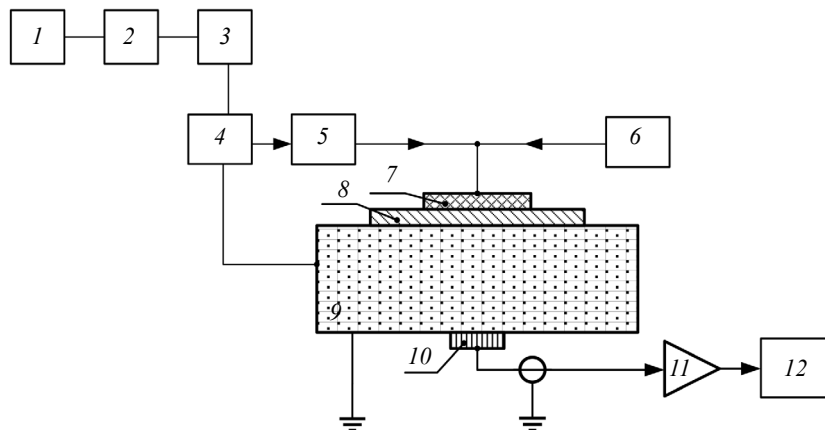


Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки:

1 — генератор высокочастотных импульсов; 2 — гальваническая развязка; 3 — «Н»-мост; 4 — повышающий широкополосный симметрирующий трансформатор; 5 — разделительный конденсатор; 6 — источник поляризующего электрического напряжения; 7 — электрод ПЕТ; 8 — диэлектрический слой; 9 — объект контроля; 10 — миниатюрный ПЭП; 11 — малошумящий полосовой усилитель; 12 — осциллограф

Для выполнения экспериментальных исследований по возбуждению ультразвуковых импульсов ЕП разработан стенд, блок-схема которого приведена на рис. 6. В состав стенда входит электропроводная плоскопараллельная пластина 9 толщиной 20 мм (объект контроля) без зачистки ее поверхности ввода ультразвуковых импульсов. На пластину 9 через диэлектрик 8 толщиной 0,06 мм поместили круглый электрод 7 из стали толщиной 0,25 мм и диаметром 26 мм. К электроду 7 через разделительный конденсатор 5 (емкость которого на порядок больше емкости преобразователя) прикладывается переменное напряжение с амплитудой 1 кВ. Для исключения временного влияния поляризационного эффекта в диэлектрике под электродом ПЕТ на результаты измерений амплитуды, в составе стенда использован источник поляризующего электрического напряжения 6 (1 кВ). Пакетные импульсы длительностью три периода частотой 5 МГц формируются генератором 1, который через гальваническую развязку 2 генерирует импульсы на «Н»-мост 3, функция которого в попеременной коммутации первичной обмотки повышающего широкополосного симметрирующего трансформатора 4 для создания на вторичной обмотке импульсов высокого напряжения. Для исключения попадания поляризующего напряжения на трансформатор применен пленочный неполярный конденсатор 5. С противоположной стороны пластины 9 установлен миниатюрный пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) 10 (с резонансной частотой 5 МГц, радиусом 2 мм), подключенный к малошумящему полосовому усилителю 11 с коэффициентом усиления, равным 1000. С выхода усилителя 11 принятый сигнал подается на осциллограф 12.

На рис. 7 на экране осциллографа показано изображение реализации ультразвуковых импульсов, излученных ПЕТ и принятых миниатюрным ПЭП.

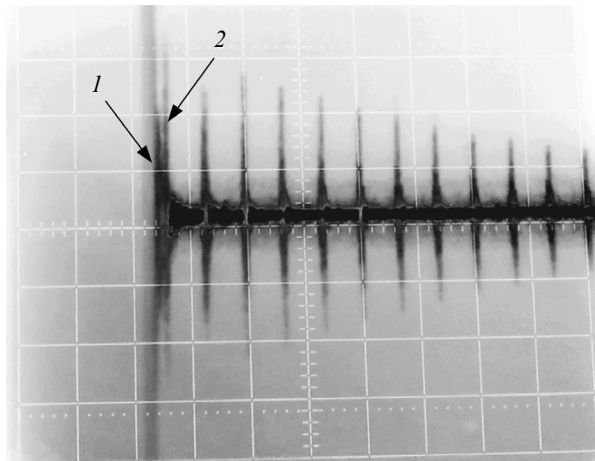


Рис. 7. Принятая миниатюрным ПЭП последовательность импульсов, сформированная от одной посылки емкостного датчика (0,2 В/дел, 10 мкс/дел):

1 — зондирующий импульс; 2 — первый принятый донный импульс.

Анализ данных, приведенных на рис. 7, показывает, что отношение амплитуд донных импульсов и шума без применения методов обработки принятых донных импульсов составляет около 15 раз. Таким образом, подтверждается возможность приведения измерений, контроля и диагностики как минимум теньвым методом. Следует отметить незначительную «мертвую» зону контроля.

Очевидно, что предложенным ГВИ за счет увеличения величины поляризующего напряжения и пиковой амплитуды переменного напряжения возможно значительное повышение амплитуды возбуждаемых ультразвуковых пакетных импульсов.

ВЫВОДЫ

1. Разработан блок формирователя последовательности импульсов, модуль гальванической опторазвязки, высоковольтный полумост и повышающий симметричный широкополосный трансформатор для использования в составе измерительной, контрольной и диагностической техники на основе ПЭТ.

2. Предложен вариант практической реализации генератора мощных радиоимпульсов напряжения на базе микроконтроллера, силовых MOSFET транзисторов и симметричного повышающего широкополосного трансформатора, который обеспечивает на ПЭТ высокочастотные высоковольтные импульсы положительной и отрицательной полярностей, амплитудой до 1 кВ, частотой до 5 МГц и длительностью три периода частоты заполнения.

3. Экспериментально доказана реализуемость излучения ультразвуковых колебаний емкостным методом на практике с применением современных достижений в области электротехники. Показано, что соотношение донный сигнал/шум достигает 15 раз. Возможно дальнейшее повышение амплитуды возбуждаемых импульсов путем повышения поляризующего и импульсного напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий: монография. Харьков: ТОВ «Планета-принт», 2016. 230 с.
3. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Радев Х.К., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвуковой толщинометрии ферромагнитных металлоизделий без удаления диэлектрического покрытия // Технічна електродинаміка. 2016. № 2. С. 78—82.
4. <https://acsys.ru/ultrazvukovoj-tester-a1410-pulsar/>
5. Wright W.M.D, Hutchins D.A. Air-coupled testing of metals using broadband pulses in through-transmission // Ultrasonics. 1999. V. 37. P. 19—22. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(98\)00034-1](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(98)00034-1)

6. *Palmer S.B., Dixon S.* Industrially viable non-contact ultrasound // *Insight*. 2003. V. 45. No. 3. P. 211—217. DOI: <https://doi.org/10.1784/insi.45.3.211.53154>
7. *Кондратьев А.И., Кондратьев А.А., Римлянд В.И., Драчев К.А.* Измерение скорости распространения и коэффициента затухания продольных волн в тонких образцах // *Вестник ТОГУ*. 2013. Т. 31. № 4. С. 17—24.
8. *Кондратьев А.И.* Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твердых сред. В двух частях. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. 152 с.
9. *Луговой В.А.* Широкополосный емкостный приемник акустических сигналов / Сейсмоакустика переходных зон: материалы 3-го Всероссийского симпозиума. Владивосток, 2003. С. 56—58.
10. *Король А.А.* Алгоритмическое и программное обеспечение измерительного комплекса для определения параметров распространения различных типов акустических волн в твердых средах / Дисс. ... канд. техн. наук. 05.11.16. Место защиты: Тихоокеан. гос. ун-т. Хабаровск, 2011. 140 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/2448.
11. *Ноздрачева Е.Л., Сучков Г.М., Петрищев О.Н.* Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. Красноармійськ. 2015. Т. 28. № 1. С. 165—170.
12. *Myhushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L.* Model of electromechanical receiving transducers of ultrasound Rayleigh wave // *Technical Electrodynamics*. 2016. № 6. P. 83—89. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.083>
13. *Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L., Suchkov G.M., Myhushchenko R.P., Kropachek O.Yu., Plesnetsov S.Yu.* Improving principles of electric energy pulse transformation into high-frequency mechanical energy using capacitive method // *Technical Electrodynamics* 2019. № 6. P. 18—24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.018>
14. *Зайцева Л.В.* Плівкові гетеросистеми ємнісних перетворювачів на основі поліаміду, оксидів індію, олова та алюмінію / Дисертація ... канд. техн. наук. 01.04.07. НАН України. Ін-т електрофізики і радіац. технологій. Харків, 2015. 190 с.
15. *Гитис М.Б., Добромыслов В.М., Сажин В.В.* Определение некоторых параметров датчиков ультразвуковых дефектоскопов // *Дефектоскопия*. 1971. № 1. С. 51—57.
16. *Мигачев С.А., Куркин М.И., Смородинский Я.Г.* Бесконтактное возбуждение звука в металле видеопульсом электрического поля // *Дефектоскопия*. 2016. № 11. С. 48—53.
17. *Вискушенко А.А., Ремнев А.М., Смердов В.Ю.* Высоковольтный формирователь пачек импульсов // *Приборы и техника эксперимента*. 2001. № 1. С. 77—79.