

УДК 620.179.16; 620.179.17

Е.Л. Ноздрачева (канд. техн. наук, доц.)<sup>1</sup>, Г.М. Сучков (д-р техн. наук, проф.)<sup>1</sup>,  
О.Н. Петрищев (д-р техн. наук, проф.)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт», г. Харьков  
кафедра приборов и методов неразрушающего контроля

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт», г. Киев,  
кафедра акустики и акустоэлектроники

E-mail: nozdrachova\_katy@mail.ru; suchkov\_gm@mail.ru; petrischev@ukr.net

### ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ЕМКОСТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

*Экспериментальными исследованиями подтверждены результаты теоретических исследований о том, что акустическое поле, возбуждаемое емкостным ультразвуковым способом, зависит от размера электрода преобразователя. Установлено, что возбуждающая ультразвуковые импульсы поверхность объекта контроля превышает размер электрода емкостного преобразователя. Показано, что формирование импульсного акустического поля обусловлено неравномерным распределением электрических зарядов на поверхности металла изделия под и возле проекции электрода емкостного преобразователя на металл.*

**Ключевые слова:** ультразвуковой неразрушающий контроль, емкостной преобразователь, плотность зарядов, электрод, импульсы.

**Общая постановка проблемы.** В настоящее время все чаще для контроля качества изделий и определения свойств материалов применяют бесконтактные ультразвуковые приборы и установки [1–4]. Многие из них давно и успешно работают в промышленных условиях [3–4]. Наиболее часто применяются устройства на основе электромагнитно – акустического (ЭМА) способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов [1-4]. Однако, этот способ имеет ряд недостатков, возникающих при контроле ферромагнитных изделий (из-за наличия на поверхности изделия окалина). Имеются сложности при возбуждении и приеме коротких ультразвуковых импульсов или импульсов с высокой частотой заполнения возбуждаемого пакета.

Потенциально исключить указанные недостатки ЭМА способа возможно путем применения емкостного способа (ЕС) возбуждения и приема ультразвуковых импульсов [1–2]. Однако не взирая на то, что в этом направлении исследования ведутся достаточно давно [5–8], этот способ не нашел широкого применения. По нашему мнению такое положение обусловлено недостаточностью как теоретических, так и экспериментальных исследований емкостного способа.

**Цель исследований.** Новые теоретические исследования [9] показали, что основным влияющим фактором, определяющим возбуждаемое ультразвуковое поле, является плотность зарядов в поверхностном слое металла. Также установлено, что основными факторами возбуждения импульсов являются не только поляризующее напряжение; емкость преобразователя (диэлектрическая проницаемость); величина зазора между преобразователем и изделием, но и размеры и геометрия электрода емкостного преобразователя (ЕП). При этом авторами [9] было теоретически показано что плотность зарядов на поверхности электропроводного материала под электродом ЕП небольшого

диаметра, определяющая механические напряжения в поверхностном слое металла, не является постоянной величиной. Таков вывод можно считать неординарным и требует экспериментальной проверки.

**Результаты разработки и исследований.** Для экспериментальной проверки теоретических исследований [9], т.е. исследований влияния геометрических размеров ЭП на возбуждение ультразвуковых импульсов разработан стенд, блок-схема которого приведена на рис.1. В состав стенда входит электропроводная пластина 1 толщиной 25 мм (образец). Толщина пластины 1 выбиралась из условия формирования на ее противоположной стороне плоского фронта ультразвукового поля («прожекторная» зона [1–2]). На пластину 1 через диэлектрик 2 толщиной 0,4 мм поместили круглый медный электрод 3 толщиной 30 мкм и диаметром 24 мм. К электроду 3 был подключен регулируемый источник 4 постоянного поляризующего поля и источник 5 пакетных импульсов с возможностью регулировки их частоты, длительности и амплитуды напряжения. За счет взаимодействия поляризующего постоянного и импульсного переменного напряжений в поверхностном слое металла возбуждаются ультразвуковые импульсы, распространяющиеся вглубь объекта контроля.

С противоположной стороны пластины 1 установлен серийный пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) 6 (5 МГц, диаметр 5 мм), подключённый к усилителю 7. С выхода усилителя 7 принятый сигнал подается на осциллограф 8 С1-65А.

При выполнении исследований на электрод 3 подавали напряжение +850 В (поляризующее поле) и пакетный высокочастотный импульс с амплитудой  $\pm 650$  В и заполнением 4 периода частоты (5 МГц). Далее перемещали ПЭП относительно оси электрода 3 вдоль его радиуса и принимали прошедший через пластину 1 сигнал. Усиливали его и измеряли амплитуду принимаемого ультразвукового импульса с помощью осциллографа 8.

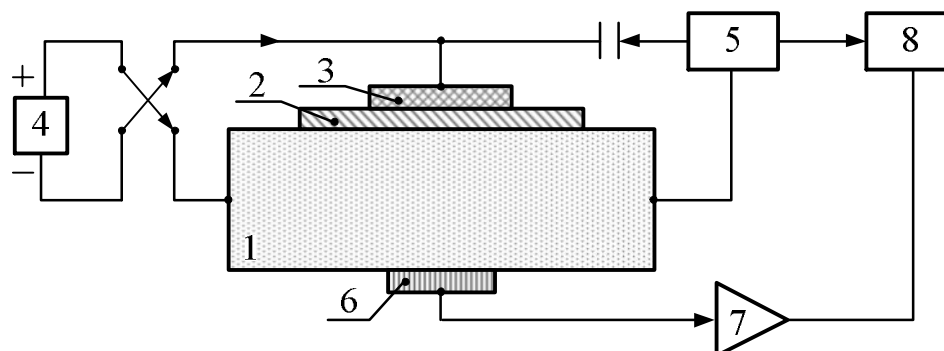


Рисунок 1 – Блок-схема стенда для исследования влияния диаметра электрода ЭП на характеристики ультразвуковых импульсов

Методика выполнения эксперимента может дать возможность качественно определить распределение плотности зарядов на поверхности образца вдоль радиуса электрода. Если, считать, что их распределение однородно под электродом, то и амплитуды принятых сигналов под электродом 3 должны быть одинаковы (сигнал должен быть одинаковым до перемещения приемного преобразователя из под проекции возбуждающего электрода 3). Если распределение плотности зарядов не однородно, то амплитуда принимаемого импульса изменится до начала перемещения приемного ПЭП из под электрода 3 ЭП.

Полученная экспериментальная зависимость, рис.2, качественно подтверждает данные теоретических исследований [9]. Но характер экспериментальной и теоретической зависимостей отличаются. Возможными причинами получения такой зависимости могут быть: суммирование амплитуд ультразвуковых лучей со значительной поверхности образца приемным ПЭП; использование возбуждающего пакетного импульса большой длительности; значительный диаметр приемного ПЭП.

Для исключения влияния на результаты измерений упомянутых факторов были проведены исследования величины амплитуды ультразвуковых импульсов в зависимости от относительного смещения с шагом 1 мм осей ПЭП с пластиной диаметром 2 мм и медного электрода толщиной 30 мкм емкостного преобразователя диаметром 31 мм.

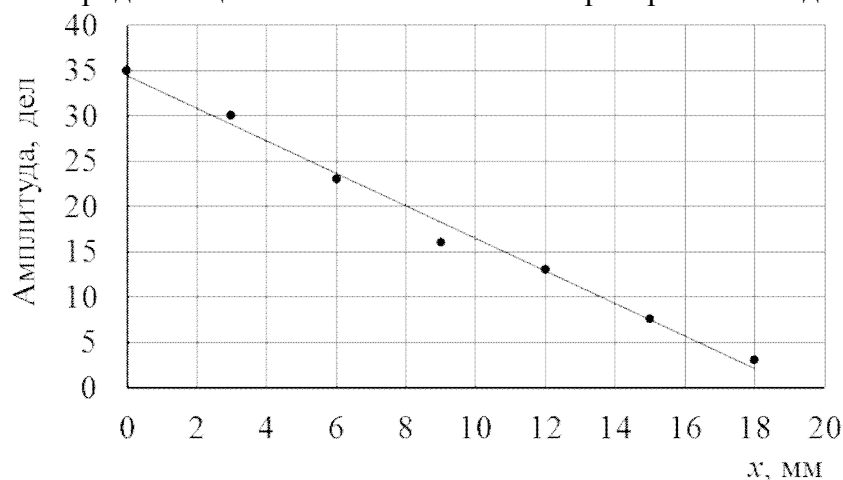


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды ультразвукового теневого импульса, возбужденного ёмкостным преобразователем и принятого ПЭП (5 МГц, диаметр 5 мм), от смещения от центра электрода  $x$  (мм) приемного преобразователя относительно оси ЕП

ЕП возбуждали одним периодом напряжения частотой 5 МГц. При выполнении исследований ПЭП и ЕП в исходном состоянии были установлены соосно с противоположных сторон стального образца толщиной 9,5 мм. Измерялись амплитуды первого  $U_1$  и второго  $U_2$  полупериодов принятого первого прошедшего через изделие сигнала. Результаты измерений приведены на рис. 3 ( $\rho$  – текущая координата,  $R$  – радиус электрода ЕП).

Из анализа данных, приведенных на рис. 3 следует, что плотность зарядов на поверхности полупространства не является равномерной и изменяется к краю проекции электрода ЕП. Кроме того, наблюдается наличие значительного сигнала и за проекцией электрода ЕП. Причем, при смещении приемного ПЭП за пределы электрода ЕП не происходит смещения принимаемого сигнала по времени. То есть принимался импульс излученный нормально поверхности металла, а не под углом к нему. При этом длительность принятого импульса также не увеличивается, что практически исключает прием части сигнала под углом к приемному ПЭП. Эти данные согласуются с результатами работ [5-8], где возбуждение ЕП осуществлялось коротким однополярным импульсом, а прием теневого сигнала осуществлялся лазерным интерферометром (толщина образца 10 мм).

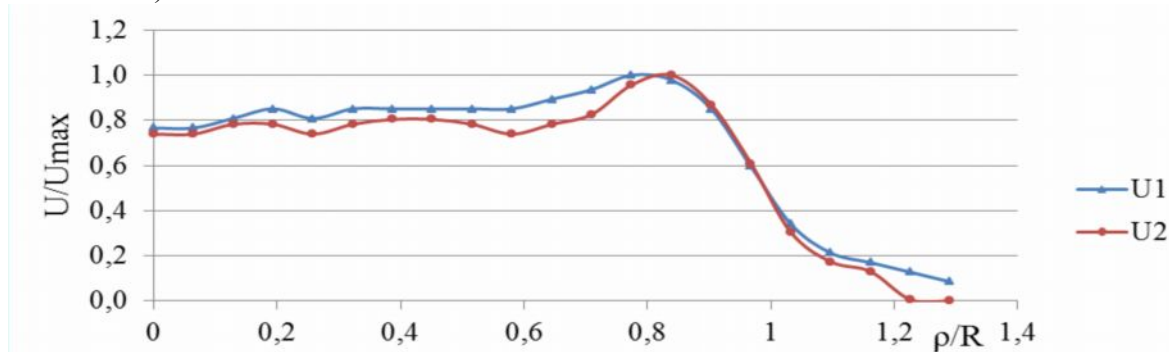


Рисунок 3 – Зависимость относительной амплитуды принятого сигнала от относительного смещения осей ПЭП и ЕП

Объяснить этот эффект можно тем, что на «индуцированные» на поверхности полупространства заряды действуют две основные силы. С одной стороны – сила притяжения зарядами на поверхности металла электрода ЕП, а с противоположной – силы отталкивания одноименных зарядов на поверхности металла. Очевидно, силы отталкивания и приводят к смещению зарядов за проекцию электрода ЕП на полупространство металла,

уменьшая их плотность под проекцией. При малых величинах электрода также наблюдается неравномерное распределение электрических зарядов на поверхности объекта контроля [10], что качественно подтверждает полученные экспериментально результаты.

**Выводы и рекомендации.** Из анализа результатов выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Подтверждены теоретические выводы о том, что распределение зарядов на поверхности металла под электродом ЕП в центре имеет равномерный характер, к краю электрода плотность зарядов увеличивается, а затем происходит плавное уменьшение плотности, в том числе и за пределами проекции электрода.

2. При определении диаграммы направленности ЕП необходимо учитывать размер реальной излучаемой ультразвуковое поле поверхности.

### Список использованной литературы

1. 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.
2. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: практ. пособие: в 5 кн. кн. 2. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. – М. : Высшая школа, 1991. – 283 с.
3. Сучков Г.М. Энерго- и ресурсосберегающие приборы и технологии неразрушающего контроля / Г.М. Сучков, С.А. Алексеев, В.В. Захаренко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев, 2006. – № 4. – С. 29 – 34.
4. Сучков Г. М. О главном преимуществе ЭМА способа / Г.М. Сучков // Дефектоскопия. – 2000. – № 10. – С. 67–70.
5. Дробот Ю.В. Возбуждение коротких упругих импульсов емкостным методом / Ю.В. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1983. – №3. – С.35 – 37.
6. Кондратьев А.И. Датчик акустических сигналов для высокоточных измерений/ А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1990. – № 3. – С. 30–38.
7. Кондратьев А.И. Измерение скорости и затухания Рэлеевских волн емкостным преобразователем / А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Измерительная техника. – 1991. – №5. – С. 43–44.
8. Кондратьев А.И. Измерение скорости распространения и коэффициента затухания продольных волн в тонких образцах / А.И. Кондратьев, А.А. Кондратьев, В.И. Римлянд, К.А. Драчёв // Вестник ТОГУ. 2013. № 4(31). – С. 17-24.
9. Сучков Г.М. О возбуждении ультразвуковых волн в металлах емкостным преобразователем. Часть 1/ Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, Е.Л. Ноздрачева, В.В. Карпусь // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев. – 2015 – № 1.
10. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Т.5 Электричество и магнетизм / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир, 1966. – 296 с.

### References

1. Kljuev, V.V. (2004), *Nerazrushajushhij kontrol'* [Non-Destructive Testing], № 3, in Ermolov, I.N. (ed.), *Mashinostroenie*, Moscow, Russia.
2. Ermolov, I.N., Aleshin N.P. and Potapov A.I. (1991), *Nerazrushajushhij kontrol'* [Non-Destructive Testing], № 2, in Suhorukov, V.V. (ed.), *Vyshhaja shkola*, Moscow, Russia.
3. Suchkov, G.M., Alekseev E. A. and Zaharenko V.V. (2006), “Energy- and resource-saving devices and technologies of nondestructive testing”, *Tekhnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'*, vol. 4., pp. 29-34.
4. Suchkov, G. M. (2000), “The main advantages of the EMA method”, *Defektoskopija*. vol. 10.

- pp. 67–70.
5. Drobot, Ju.V., Kondrat'ev A.I. and Lugovoj V.A. (1983), "Excitation short elastic pulses capacitive method", *Defektoskopija*. vol. 3. pp. 35-37.
  6. Kondratev, A.I. and Lugovoy V.A. (1990), "The acoustic transducer for Precision Measurement", *Defektoskopija*. vol. 3. pp. 30-38.
  7. Kondratev, A.I. and Lugovoy V.A. (1991), "Measurement of velocity and attenuation of Rayleigh waves capacitive transducer", *Izmeritel'naja tehnika*, vol. 5. pp. 43-44.
  8. Kondratev, A.I., Kondratev A.A., Rimlyand V.I. and Drachyev K.A. (2013), "The measurement of the propagation velocity and attenuation coefficient of longitudinal waves in thin samples", *Vestnik TOGU*, vol. 4. no. 31. pp. 30-38.
  9. Suchkov, G.M., Petrishhev O.N., Nozdracheva E.L. and Karpus' V.V. (2015), "Excitation of acoustic waves in metals capacitive transducer. Part 1", *Tehnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'*, vol. 4.
  10. Feynman, R., Leighton R., and Sands M. (1966), "*Fejnmanovskie lekcii po fizike. Jelektrichestvo i magnetizm*" [The Feynman Lectures on Physics Volume II. Mainly electromagnetism and matter]. Translated by Kopylov, G.I., Simonov, Ju.A., Mir, Moscow, Russia.

Поступила в редакцію:  
24.03.2015

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. А.А. Зори

**К.Л. Ноздрачова, Г.М. Сучков.**

**Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"**

**О.М. Петрищев**

**Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"**

**Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным перетворювачем.** Експериментальними дослідженнями підтверджено результати теоретичних досліджень про те, що акустичне поле, що збуджується емкостним ультразвуковим способом, залежить від розміру електрода перетворювача. Встановлено, що збуджуюча ультразвукові імпульси поверхня об'єкта контролю перевищує розмір електрода емкостного перетворювача. Показано, що формування імпульсного акустичного поля обумовлено нерівномірним розподілом електричних зарядів на поверхні металовиробу під і біля проекції електрода емкостного перетворювача на метал.

**Ключові слова:** ультразвуковий неруйнівний контроль, емкостний перетворювач, щільність зарядів, електрод, імпульси.

**K.L. Nozdrachova, G.M. Suchkov.**

**National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"**

**O.N. Petrishev**

**National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"**

**Excitation of ultrasonic pulses with a capacitive transducer.** This article describes the possibility of implementing capacitive method of ultrasonic non-destructive testing. To perform the research capacitive ultrasonic transducer (CUT) mode excitation of ultrasonic pulses has been developed and new stand blocks were manufactured: the short pulses high-voltage unipolar generator; wideband low-noise pre-amplifier; small-sized partially damped receiving piezoelectric transducer. The applied method of performing experiments made it possible to qualitatively determine the distribution of the charge density on the surface of the sample along the radius of the capacitive transducer electrode. Experimentally we confirmed theoretical calculations. The stand includes a conductive plate with thickness of 25 mm (sample). Plate thickness was chosen from the conditions

of formation on the opposite side of the flat front of the ultrasonic field ("Spotlight" area). Plate via a dielectric with thickness of 0.4 mm was placed round copper electrode with thickness of 30 microns and a diameter of 24 mm. The electrode was connected to a variable dc polarizing field and the source of a packet of pulses with adjustable their frequency, duration and amplitude of the voltage. Due to the interaction of the polarizing DC voltage and pulsed AC voltage in the surface layer of metal ultrasonic pulses are excited that propagate deep into the control object. On the opposite side of the plate a serial piezoelectric transducer (PZT) was connected to an amplifier. With the amplifier the output signal is passed to an oscilloscope. Studies were conducted in the amplitude of ultrasonic pulses depending on the relative displacement of 1 mm pitch axes probe with a diameter of 2 mm plate and a copper thickness of 30 microns, electrode capacitive transducer diameter of 31 mm. (CUT) excited a voltage period of 5 MHz frequency. PZT and CUT in the initial state are mounted coaxially on opposing sides of a steel sample having thickness of 9.5 mm. We measured amplitudes of the first and second half-periods of the first received signal passing through the product. From the analysis of the data presented in the paper it follows that the charge density on the surface of the half-space is not uniform and varies to the edge of the projection of the electrode EP. Furthermore, the presence of significant signal is observed beyond the projection of electrode EP. Moreover, the displacement of the receiving electrode PZT beyond CUT displacement occurs at the time of the received signal. That is, the received pulses emitted normal to the surface of the metal, rather than at an angle to it. The duration of the received pulse also increases, that practically excludes receiving of the signal at an angle to PZT receiver.

**Keywords:** ultrasonic nondestructive testing, capacitive transducer, charge density, electrode impulses.



**Ноздрачева Екатерина Леонидовна**, Украина, окончила Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля», НТУ «ХПИ» (ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина). Основное направление научной деятельности – разработка методов и средств ультразвукового контроля.



**Сучков Григорий Михайлович**, Украина, окончил Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы и методы неразрушающего контроля», НТУ «ХПИ» (ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина). Основное направление научной деятельности – разработка нетрадиционных методов и средств контроля и измерений; акустический контроль; электромагнитный контроль; магнитный контроль; контроль толщины покрытий; измерение параметров магнитных полей.



**Петрищев Олег Николаевич**, Украина, закончил Киевский политехнический институт, доктор техн. наук, профессор кафедры «Акустика и акустоэлектроника» Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», НТУУ «КПИ» (просп. Перемоги, 37, г. Киев-56, 03056, Украина). Основное направление научной деятельности – разработка и теоретические исследования электроакустических преобразователей, работающих на различных физических принципах.