

УДК 534.232.082.744:621.317.334.2

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАНКЕЛЯ В РАСЧЕТАХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ КОЛЬЦЕВЫХ КАТУШЕК. ЧАСТЬ 1**О. Н. ПЕТРИЦЕВ¹, М. И. РОМАНЮК², Г. М. СУЧКОВ³**¹Государственное предприятие «Киевский НИИ гидроприборов»
Украина, 01035, Киев, ул. Василия Сурикова, 3²Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»
Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37³Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Украина, 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2

Аннотация. В современных приборах неразрушающего контроля и технической диагностики металлоизделий главным образом используются электроакустические преобразователи электромагнитного типа. Проблема влияния измерительного прибора на параметры регистрируемых сигналов, т. е. на результаты измерений, может быть устранена, если заранее известно влияние размеров электрического контура излучателей и приемников переменного магнитного поля на эффективность генерации и приема упругих волн электромагнитно-акустическим способом.

Статья посвящена разработке и апробации метода расчета индуктивности электрического контура кольцевых катушек, которые используются в электроакустических преобразователях электромагнитного типа. Усовершенствование вычислительной техники позволило для указанной цели применить методы интегральных преобразований, до сих пор считающиеся непригодными для практических расчетов.

Представлен новый метод расчета индуктивности электрического контура, располагающегося вблизи токопроводящего ферромагнетика. Показано решение модельного примера для случая кольцевой катушки в вакууме. Достоверность предложенного метода подтверждена полученными результатами, которые полностью соответствуют общеизвестному представлению о поведении электромагнитного поля в токопроводящем ферромагнетике.

Ключевые слова: электромагнитно-акустический преобразователь; индуктивность; кольцевая катушка; уравнения Максвелла; интегральные преобразования Ханкеля; ферромагнетик

1. ВВЕДЕНИЕ

Электроакустические преобразователи электромагнитного типа, предназначенные для возбуждения и приема ультразвуковых волн в металлоизделиях с целью их неразрушающего контроля [1], состоят из источника переменного магнитного поля, и соответствующего приемника, источника постоянного поля подмагничивания, и некоторого объема металла, находящегося в ближайшей окрест-

ности источника (приемника) переменного магнитного поля, в котором происходят процессы взаимопревращения энергии электромагнитного поля в энергию упругих колебаний материальных частиц металла, и наоборот.

На рис. 1 схематически показаны элементы преобразователя электромагнитного типа, который возбуждает ультразвуковые волны в толстой пластине из металла ферромагнитной группы. Позицией 1 на рис. 1 обозначен источ-

DOI: [10.20535/S0021347020050027](https://doi.org/10.20535/S0021347020050027)

© О. Н. Петрицев, М. И. Романюк, Г. М. Сучков, 2020

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. R. B. Thompson, "Physical principles of measurements with emat transducers," in *Physical Acoustics*, vol. 19, no. C, Academic Press, 1990, pp. 157-200, doi: [10.1016/B978-0-12-477919-8.50010-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-477919-8.50010-8).
2. G. M. Suchkov, A. V. Donchenko, A. V. Desyatnichenko, A. A. Kelin, and E. L. Nozdracheva, "Increasing the sensitivity of EMA devices," *Russ. J. Nondestruct. Test.*, vol. 44, no. 2, pp. 86-90, 2008, doi: [10.1134/S1061830908020022](https://doi.org/10.1134/S1061830908020022).
3. С.Ю.Плеснецов, О.Н.Петрищев, Р.П.Мигущенко, and Г.М.Сучков, "Моделирование процесса электромагнитно-акустического преобразования при возбуждении крутильных волн," *Технічна електродинаміка*, no. 3, pp. 79-88, 2017, doi: [10.15407/techned2017.03.079](https://doi.org/10.15407/techned2017.03.079).
4. А.Г.Горбашова, О.Н.Петрищев, М.И.Романюк, Г.М.Сучков, and С.В.Хацина, "Исследование передаточных характеристик ультразвуковых трактов с электромагнитным возбуждением и регистрацией волн Рэлея в ферромагнетиках. Часть 1," *Електроніка та зв'язок*, no. 2, pp. 69-80, 2013, uri: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21446152>.
5. R. Ribichini, F. Cegla, P. B. Nagy, and P. Cawley, "Study and comparison of different EMAT configurations for SH wave inspection," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 58, no. 12, pp. 2571-2581, 2011, doi: [10.1109/TUFFC.2011.2120](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2011.2120).
6. M. Seher, P. Huthwaite, M. Lowe, P. Nagy, and P. Cawley, "Numerical design optimization of an EMAT for A0 Lamb wave generation in steel plates," in *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1581 33, no. 1, pp. 340-347, doi: [10.1063/1.4864839](https://doi.org/10.1063/1.4864839).
7. H. M. Seung, C. Il Park, and Y. Y. Kim, "An omnidirectional shear-horizontal guided wave EMAT for a metallic plate," *Ultrasonics*, vol. 69, pp. 58-66, 2016, doi: [10.1016/j.ultras.2016.03.011](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.03.011).
8. D. Rueter, "Induction coil as a non-contacting ultrasound transmitter and detector: Modeling of magnetic fields for improving the performance," *Ultrasonics*, vol. 65, pp. 200-210, 2016, doi: [10.1016/j.ultras.2015.10.003](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.10.003).
9. J. Isla and F. Cegla, "Optimization of the bias magnetic field of shear wave EMATs," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 63, no. 8, pp. 1148-1160, 2016, doi: [10.1109/TUFFC.2016.2558467](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2016.2558467).
10. J. He, K. Xu, and W. Ren, "Designs for improving electromagnetic acoustic transducers' excitation performance," *Japanese J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 6, p. 067202, 2018, doi: [10.7567/JJAP.57.067202](https://doi.org/10.7567/JJAP.57.067202).
11. П.Л.Калантаров and Л.А.Цейтлин, *Расчет индуктивностей. Справочная книга*. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986.
12. И.Е.Тамм, *Основы теории электричества*, 11th ed. Москва: Физматлит, 2003.
13. Н.С.Кошляков, Э.Б.Глинер, and М.М.Смирнов, *Уравнения в частных производных математической физики*. Москва: Высшая школа, 1970, uri: <http://alexandr4784.narod.ru/kgs.html>.
14. М.Абрамовиц and И.Стиган, Eds., *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами*. Москва: Наука, 1979.
15. В.И.Смирнов, *Курс высшей математики*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008.

Поступила в редакцию 13.03.2019

После доработки 09.03.2020

Принята к публикации 29.04.2020