

**Received:** 26.10.2022

**Revised:** 29.11.2022



**Accepted:** 23.12.2022

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2022.6.016-024

## A SURFACE EDDY CURRENT TRANSDUCER FOR METAL LOSS DETECTION

Yu. Ya. Reutov

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russia*

 <https://orcid.org/0000-0002-7847-6004>  [asija1@yandex.ru](mailto:asija1@yandex.ru)

Corresponding author. E-mail: [asija1@yandex.ru](mailto:asija1@yandex.ru)

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620990, Russian

Tel.: +7 (343) 378 3674

The paper reports the results of an experimental study of the work of a surface eddy current transducer in terms of detecting and testing metal loss under one-sided access conditions. The transducer consists of an exciting coil and a microchip Hall-effect transducer placed in it. The phase shift of the voltage from the Hall probe output relative to the current in the exciting coil, measured by a digital phase meter, is used as an informative parameter. The experiments were carried out on a package of duralumin plates. It is shown that, when the thickness of the duralumin test object is 12.5 mm, a fairly linear transformation of metal loss from 0 to 50 % at a frequency of 640 Hz is possible. The results can be useful in the development of devices for detecting metal corrosion losses in non-ferromagnetic objects with a thickness of tens of millimeters under one-sided access conditions.

**Keywords:** eddy current transducer, microchip Hall-effect transducer, metal loss assessment, metal corrosion.

### Acknowledgment

*The work was carried out within the framework of the state assignment from the Russian Ministry of Education and Science, theme: Diagnostics, No. 122021000030-1.*

### References

1. Gusev E.A., Korolev M.V., Karpel'son A.E., Sosonin F.R. *Pribory nerazrushayushchego kontrolya tolshchiny v mashinostroenii* [Instruments for Nondestructive Thickness Tests in Machine Building]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. (In Russian).
2. Bezlyud'ko G.Y., Dolbnya E.V., Leshchenko N.G., Muzhitskii V.F. & Remezov V.B. Portable Electromagnetic-Acoustic Thickness Meters (EMAT). *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2004, vol. 40, pp. 239–245. DOI: 10.1023/B:RUNT.0000043672.63881.ca.
3. Suchkov G.M. The capacities of modern EMA thickness gages. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2004, vol. 40, No. 12, pp. 801–807. DOI: 10.1007/s11181-005-0109-6.
4. Agzamova P.A., Volkov A.V., Gobov Yu.L., Grammatin A.V., Reutov Yu.Ya. Magnetic flaw detector. Russian Federation Utility Model Patent No. 119885, 2012. (In Russian).
5. Dorofeev A.L. *Nerazrushayushchie ispytaniya metodom vikhrevykh tokov* [Non-destructive testing by the eddy currents methods]. Moscow, Oborongiz Publ., 1961, 158 p. (In Russian).
6. Shkarlet Yu.M. In: *Nerazrushayushchiye metody kontrolya materialov i izdelii: sbornik* [Non-destructive testing of materials and products: collection, S.T. Nazarova, ed.]. Moscow, ON-TIPRIBOR Publ., 1964, pp. 382–396. (In Russian).

7. Lammeraner Y., Stafl M. *Vikhrevye toki* [Eddy currents, Czech transl.]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1967, 208 p. (In Russian).
8. Gerasimov V.G., Ostanin Yu.Ya., Pokrovsky A.D. etc. *Nerazrushayushchiy control kachestva izdeliy elektromagnitnymi metodami* [Non-destructive quality control of products by electromagnetic methods]. Moscow, Energiya Publ., 1978, 215 p. (In Russian).
9. Reutov Yu.Ya. Laid-on Eddy Current Transducer Field Penetration Depth into a Studied Object. *Electrichestvo*, 2018, No. 4, pp. 50–57. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-4-50-57. (In Russian).
10. Chechernikov V.I. *Magnitnye izmereniya* [Magnetic measurements]. Moscow, Mosk. Gos. Univ. Publ., 1969, 386 p. (In Russian).
11. Available at: [www.sentron.ch](http://www.sentron.ch)
12. Reutov Yu.Ya. A Peculiarity of the Magnetization of a Ferromagnet by An Alternating Field. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, vol. 6, pp. 35–47. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.6.035-047. Available at: [https://dream-journal.org/DREAM\\_Issue\\_6\\_2020\\_Reutov\\_Yu.Yu.\\_035\\_047.pdf](https://dream-journal.org/DREAM_Issue_6_2020_Reutov_Yu.Yu._035_047.pdf)
13. *Nerazrushayushchiy control* [Non-destructive testing, vol. 2, ed. by V.V. Klyuev]. Moscow., Mashinostroenie Publ., 2005, 688 p. (In Russian).

Подана в журнал: 26.10.2022



УДК 620.170.

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.016-024

## НАКЛАДНОЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОТЕРЬ МЕТАЛЛА

Ю. Я. Реутов

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН,  
д. 18, ул. С. Ковалевской, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

 <https://orcid.org/0000-0002-7847-6004>  [asija1@yandex.ru](mailto:asija1@yandex.ru)

Ответственный автор. Электронная почта: [asija1@yandex.ru](mailto:asija1@yandex.ru)

Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, 620990, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 378–36–74

Приводятся результаты экспериментального исследования работы накладного вихре-токового преобразователя применительно к обнаружению и контролю потерь металла при одностороннем доступе. Преобразователь состоит из возбуждающей катушки и размещенного в ней микросхемного преобразователя Холла. В качестве информативного параметра использовался сдвиг фазы напряжения с выхода датчика Холла относительно тока в возбуждающей катушке, измеряемый цифровым фазометром. Эксперименты выполнялись на пакете пластин из дюралюминия. Показано, что при толщине объекта контроля из дюралюминия 12,5 мм возможно достаточно линейное преобразование потери металла от 0 до 50 % на частоте 640 Гц. Результаты могут быть полезны при разработке устройств для выявления коррозионных потерь металла на ферромагнитных объектах толщиной в десятки миллиметров при одностороннем доступе.

**Ключевые слова:** вихре-токовый преобразователь, микросхемный преобразователь Холла, оценка потерь металла, коррозия металла.

### 1. Введение

В эксплуатации находится большое количество металлических резервуаров и хранилищ, заглубленных в грунт. Несмотря на предпринимаемые меры защиты стенки этих сосудов со временем подвергаются коррозии (преимущественно с внешней стороны), что выражается в появлении участков меньшей толщины металла. Если такие локальные участки потери металла не будут своевременно выявлены, в конечном итоге могут произойти протечки содержимого в грунт, чреватые экономическими убытками и загрязнением окружающей среды.

Очевидно, что толщина стенок (и днища) таких резервуаров должна периодически контролироваться. Однако в данном случае такая процедура осуществима лишь при одностороннем доступе средств контроля к поверхности стенки, что препятствует использованию многих известных способов выявления потерь металла [1–3]. Применение известного акустического ЭМА-способа контроля затруднено при обследовании изделий из титана и нержавеющей стали по причине их малой электропроводности, снижающей и без того малую эффективность ЭМА-преобразования. Различные магнитостатические способы выявления потерь металла [4] применимы лишь при контроле резервуаров из ферромагнитных материалов, в то время как существенная доля объектов контроля изготавливается из слабомагнитных металлов.

Использование известных вихре-токовых средств контроля представляется предпочтительным, но наталкивается на ограничения в выборе частоты возбуждения, обусловленные значительной толщиной стенок резервуаров (десятки миллиметров). Малая частота возбуж-

дения обуславливает и малую скорость обследования контролируемой поверхности. При перемещении чувствительного элемента поискового устройства, осуществляющего сканирование обследуемой поверхности, участок потери металла, подлежащий обнаружению, может промелькнуть под ним за столь короткое время, что подвергнется воздействию малого количества колебаний переменного магнитного поля вихретокового преобразователя. Этого количества может оказаться недостаточно для четкого выявления дефекта. Чтобы этого не произошло, частота тока возбуждения вихретокового преобразователя должна быть достаточно высокой. Это обеспечит минимум времени, потребного для обследования контролируемого объекта, что немаловажно, поскольку на время обследования объект контроля обычно выводится из эксплуатации.

По указанным причинам представляет интерес поиск путей увеличения рабочих частот вихретоковых преобразователей. Согласно известной формуле [5–9], переменное магнитное поле, проникнув в металлический предмет (например в стенку или днище резервуара) ослабляется по экспоненциальному закону в  $e$  раз (2,73 раза) преодолев расстояние  $a$ , равное

$$a = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \sigma \cdot f}},$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала;  $\sigma$  – удельная электропроводность материала и  $f$  – частота переменного поля.

Именно эта величина, называемая глубиной проникновения, ограничивает возможности использования вихретоковых преобразователей для контроля металлических изделий с большой толщиной стенок. К числу таких изделий относятся, в частности, резервуары, обладающие толщиной стенок в десятки миллиметров. Если, например, резервуар изготовлен из титана с относительной магнитной проницаемостью  $\mu$  около единицы [10] и удельной электропроводностью  $\sigma$ , равной 1 млн сим./метр, то при частоте поля 1000 Гц глубина проникновения составит 16 мм.

В данной работе представлены результаты обследования накладного вихретокового преобразователя, предназначенного для выявления потерь неферромагнитного металла, предпринятого с целью определения возможностей повышения допустимой частоты возбуждения.

На первый взгляд, согласно принятой терминологии, такое устройство следовало бы называть толщиномером. Однако в результате коррозии ее продукты могут и не вызвать существенного геометрического изменения толщины стенки объекта контроля. Просто могут измениться электромагнитные характеристики пораженных коррозией участков: существенно уменьшатся их относительная магнитная проницаемость или удельная электропроводность. В результате коррозионных процессов толщина стенки в пораженном месте может даже возрасти (стенка «распухнет»). По этой причине в нашем случае, вероятно, более корректно говорить о выявлении потери металла, а не об измерении толщины объекта контроля.

## 2. Преобразователь

Преобразователь состоит из двух частей: возбуждающей (намагничивающей) катушки 1 и преобразователя индукции магнитного поля 2 в электрическое напряжение (рис. 1).

Возбуждающая катушка, внутренним диаметром 11 мм, внешним диаметром 16 мм и высотой 7 мм, содержит 160 витков провода диаметром 0,35 мм. При пропускании по ней переменного тока она создает в контролируемом изделии возбуждающее переменное магнитное поле, направленное вблизи нее вертикально. Датчик магнитного поля, представляющий собой [11] микросхемный преобразователь Холла 1SA1V (фирма Sentron), преобразует

вертикальную компоненту индукции результирующего переменного магнитного поля в переменное напряжение, подлежащее обработке в измерительной схеме. Преимущество использования в вихретоковом преобразователе сенсора магнитного поля вместо традиционной приемной катушки состоит в независимости его показаний от частоты измеряемого поля. Для обеспечения функционирования преобразователя Холла к нему подводится постоянное напряжение 5 в, потребляемый ток не превышает 10 мА. Такой преобразователь использовался в работе [12] и показал хорошие результаты.

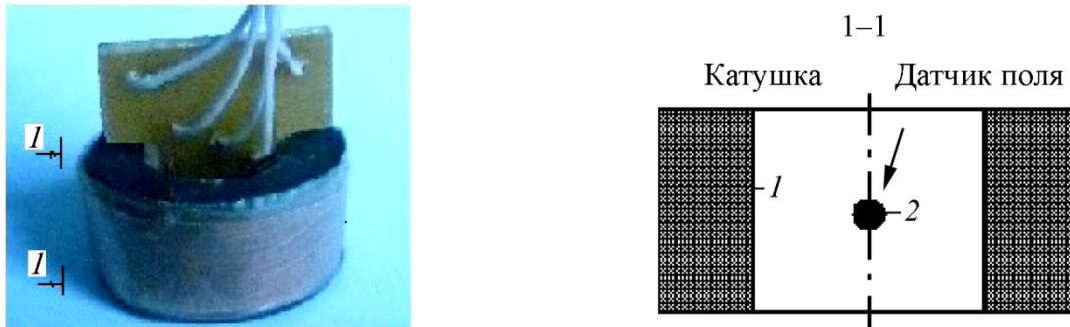


Рис. 1. Устройство вихретокового преобразователя

### 3. Выбор измеряемого электрического параметра и блок-схема экспериментальной установки

Как известно [13], модуль переменного напряжения на выходе преобразователя изменяется лишь на несколько процентов при помещении его на обследуемое ферромагнитное изделие по сравнению с его значением в отсутствие изделия. В то же время сдвиг фазы этого напряжения при наличии изделия может достигать десяти угловых (электрических) градусов относительно наблюдаемого при его отсутствии. Это означает, что наиболее целесообразно использовать в качестве информативного параметра именно сдвиг фазы напряжения на выходе преобразователя относительно возбуждающего тока, протекающего по его катушке.

На рис. 2 представлена блок-схема установки, на которой выполнялся эксперимент.

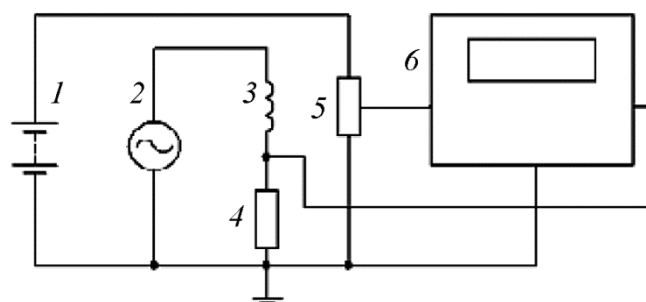


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – источник питания преобразователя Холла; 2 – генератор переменного напряжения типа ГЗ-33; 3 – возбуждающая катушка; 4 – образцовый резистор для получения опорного напряжения; 5 – преобразователь Холла; 6 – цифровой фазометр типа Ф2-34

Варьируя частоту переменного напряжения, вырабатываемого генератором 2, измеряем фазометром 6 сдвиг фаз между напряжением, снимаемым с образцового резистора 4 и напряжением с выхода преобразователя Холла 5.

Для правильного функционирования цифрового фазометра напряжение на выходе генератора 2 выбираем таким, чтобы на заданной частоте напряжения поступающие на оба входа фазометра были не менее 10 мВ.

#### 4. Обследуемые образцы

Для обследования использовался набор (пакет) квадратных дюралюминиевых пластин размером 60×60 мм, толщиной 1,25 мм, наложенных друг на друга в количестве до десяти штук. Таким образом, толщина обследуемого образца варьировалась от нуля до 12,5 мм. Вихретоковый преобразователь помещался на пакет сверху посередине. Дюралюминий был выбран по причине доступности и легкости обработки. Для изучения возможностей вихретокового преобразователя такой выбор не принципиален.

Для определения удельной электропроводности применяемого дюралюминия была вырезана полоса длиной 250 мм и шириной 7 мм. Пропусканием по ней постоянного тока заданной силы измерялось падение напряжения на участке длиной 140 мм, и по результатам измерений вычислялась удельная электропроводность. Она составила 13 МСм/м.

В этом случае глубина проникновения электромагнитного поля вычисляемая по формуле, на частоте 20 Гц составляет 31 мм, а на частоте 640 Гц – 5,5 мм.

#### 5. Результаты экспериментов

На рис. 3 представлена зависимость крутизны преобразования изменений толщины образца в полезный сигнал от частоты возбуждения преобразователя. По горизонтали отложены значения частоты  $f$ , а по вертикали – крутизна преобразования  $S$  (отношение изменения показаний фазометра в угловых градусах к вызвавшему его приращению толщины образца в миллиметрах). На заданной частоте наблюдалось изменение показаний фазометра при помещении накладного преобразователя на лист дюралюминия толщиной 1,25 мм относительно показаний при отсутствии листа.

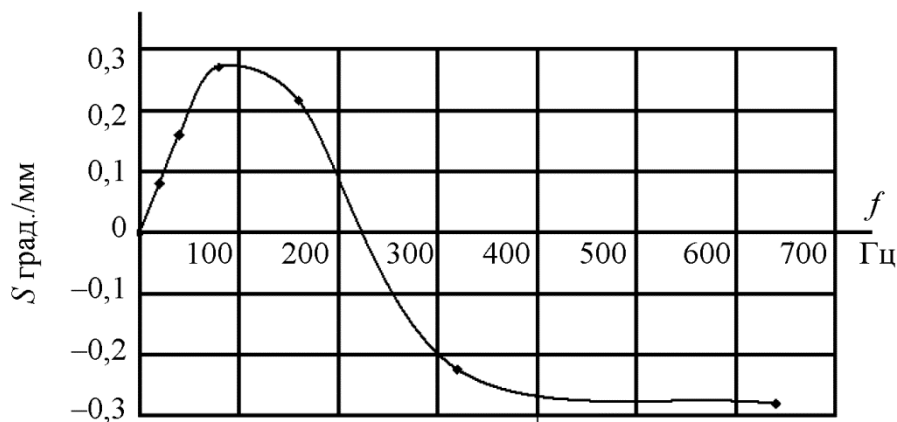


Рис. 3. Крутизна преобразования изменений толщины при разных частотах

Из рис. 3 следует, что зависимость неоднозначна. Вначале она растет с повышением рабочей частоты и достигает максимума при частоте 100 Гц, соответствующей глубине проникновения 21 мм, что в 1,7 раза больше максимальной толщины предполагаемого образца.

В то же время крутизна преобразования на высоких частотах возбуждения (более 300 Гц) не меньше, чем на низких (менее 200 Гц), хотя и противоположна по знаку. Это обстоятельство открывает возможности использовать для контроля толщины более высокие частоты, что желательно хотя бы с точки зрения производительности контроля. Эти возможности могут реализоваться лишь при условии приемлемой линейности зависимости сдвига фаз от толщины обследуемого образца.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости фазового сдвига напряжения на выходе преобразователя от толщины обследуемого образца.

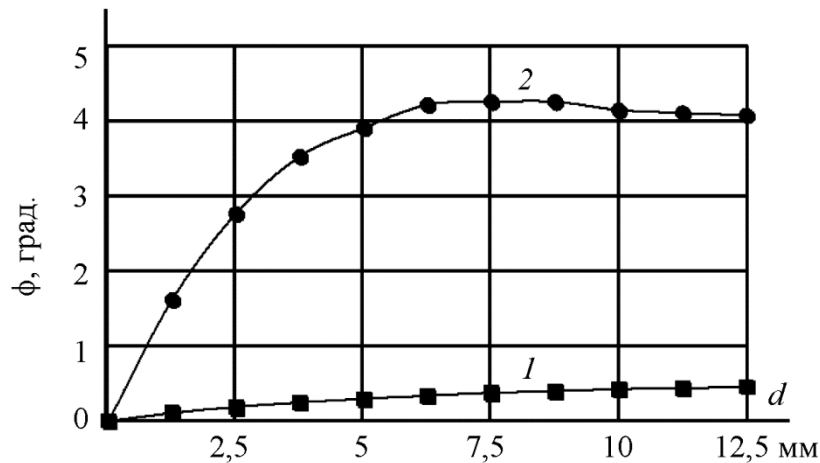


Рис. 4. Зависимость фазового сдвига от толщины образца: Кривая 1 – 20 Гц; кривая 2 – 320 Гц

По горизонтали здесь отложена толщина образца, а по вертикали угол сдвига фазы напряжения на выходе преобразователя. Кривой 1 обозначена зависимость, полученная на частоте 20 Гц, а кривой 2 – на частоте 320 Гц.

Из рис. 4 следует, что удобной для использования при частоте 320 Гц является лишь часть графика, соответствующая нарастанию толщины образца в пределах 4–5 мм. Нас же интересует область уменьшения толщины образца, т. е. степень потери металла относительно номинальной. В таком аспекте представленный график мало пригоден. По этой причине будем изучать зависимость фазового сдвига не от толщины образца, а от потери металла, относительно номинальной (максимальной) толщины.

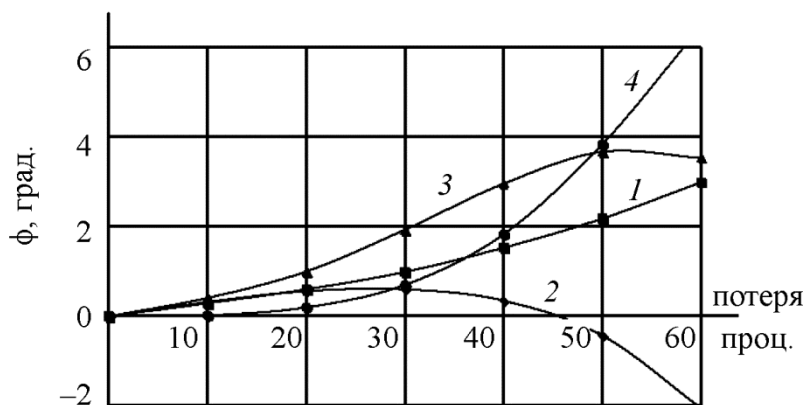


Рис. 5. Сдвиг фазы выходного напряжения в зависимости от процента потери металла при разных частотах возбуждения: кривая 1 соответствует частоте 80 Гц; кривая 2 – 320 Гц; кривая 3 – 640 Гц; кривая 4 – 1280 Гц

На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости фазового сдвига выходного напряжения преобразователя от процента потери металла при разных частотах возбуждения. По горизонтали здесь отложена потеря металла в процентах от номинальной толщины (12,5 мм), а по вертикали – угол сдвига фазы выходного напряжения преобразователя относительно возбуждающего тока.

На частотах 80 и 320 Гц кривые идут вначале почти синхронно, но, начиная с потери металла в 20 %, кривая, соответствующая частоте 320 Гц, претерпевает спад вплоть до перемены знака, в то время как кривая, соответствующая частоте 80 Гц неуклонно возрастает

вплоть до 60 % потери металла. Заметно круче, по сравнению с двумя рассмотренными, нарастает кривая, соответствующая частоте 640 Гц. Правда, рост ее прекращается после 50 % потери металла. Кривая, соответствующая частоте 1280 Гц, растет круче трех перечисленных, однако она наименее чувствительна к потере металла на начальных стадиях.

В итоге для выявления потерь металла, не превышающих половины первоначальной толщины, в нашем случае наиболее предпочтительной является частота возбуждения 640 Гц, несмотря на то, что при ней расчетная глубина проникновения магнитного поля в металл составляет менее половины номинальной толщины объекта контроля.

Получается, что при заданной номинальной толщине объекта контроля (в частности 12,5 мм) с удельной электропроводностью 13 МСм/м и данной конструкции вихретокового преобразователя для выявления степени потери металла при одностороннем доступе можно применять частоту возбуждения 640 Гц. В качестве информативного параметра при этом использовать угол сдвига фазы напряжения на выходе преобразователя относительно фазы тока в его возбуждающей катушке. При контроле изделий из металлов с гораздо меньшей электропроводностью такую частоту можно использовать для номинальных толщин в десятки миллиметров. Очевидно, что для организации контроля изделий из других металлов описанное исследование необходимо повторить.

Следует отметить, что такого же результата можно добиться, измеряя мнимую компоненту выходного напряжения преобразователя, функционально связанную с углом сдвига фазы.

## 6. Заключение

Выполнено экспериментальное исследование накладного вихретокового преобразователя оригинальной конструкции, применительно к выявлению коррозионных потерь ферромагнитного металла при одностороннем доступе.

Использование для этой цели в качестве информативного параметра сдвига фазы напряжения на выходе преобразователя относительно фазы тока в его возбуждающей катушке позволяет контролировать изделия с толщинами, в несколько раз превышающими расчетную глубину проникновения в них магнитного поля при заданной частоте.

Выявленная возможность существенного повышения частоты возбуждения вихретокового преобразователя может снизить затраты времени на дефектоскопическое обследование толстостенных конструкций при одностороннем доступе.

## Благодарность

*Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема – 9, «Диагностика» № 122021000030-1).*

## Литература

1. Гусев Е. А., Королёв М. В., Карпельсон А. Е. Приборы неразрушающего контроля толщины в машиностроении. – М. : Машиностроение, 1993. – 144 с.
2. Portable Electromagnetic-Acoustic Thickness Meters (EMAT) / G. Y. Bezlyud'ko, E. V. Dolbnya, N. G. Leshchenko, V. F. Muzhitskii & V. B. Remezov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2004. – Vol. 40. – P. 239–245. – DOI: 10.1023/B:RUNT.0000043672.63881.ca.
3. Suchkov G. M. The capacities of modern ema thickness gages // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2004. – Vol. 40, No. 12. – P. 801–807. – DOI: 10.1007/s11181-005-0109-6.
4. Магнитный дефектоскоп : пат. на полезную модель 119885 Рос. Федерация / Агзамова П. А., Волков А. В., Гобов Ю. Л., Грамматин А. В., Реутов Ю. Я., ИФМ УрО РАН. – № 2011143498/28; заявл. 27.10.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 23. – 18 с.
5. Дорофеев А. Л. Неразрушающие испытания методом вихревых токов. – М. : Оборонгиз, 1961. – 158 с.



6. Шкарлет Ю. М. Некоторые вопросы теории метода вихревых токов и расчёт накладных датчиков // Неразрушающие методы контроля материалов и изделий : сборник / под ред. проф. С. Т. Назарова. – М. : ОНТИПРИБОР, 1964. – С. 382–396.
7. Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи / пер. с чешск. – М.; Л. : Энергия, 1967, 208 с.
8. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / В. Г. Герасимов, Ю. Я. Останин, А. Д. Покровский, В. В. Сухорукое, Л. А. Чернов. – М. : Энергия, 1978. – 215 с.
9. Реутов Ю. Я. Глубина проникновения в изделие поля накладного вихретокового преобразователя // Электричество. – 2018. – № 4. – С. 50–57. – DOI: 10.24160/0013-5380-2018-4-50-57.
10. Чечерников В. И. Магнитные измерения. – М. : Издательство Московского университета, 1969. – 386 с.
11. URL: [www.sentron.ch](http://www.sentron.ch)
12. Reutov Yu. Ya. A Peculiarity of the Magnetization of a Ferromagnet by An Alternating Field // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2020. – Vol. 6. – P. 35–47. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.6.035-047. – URL: [https://dream-journal.org/DREAM\\_Issue\\_6\\_2020\\_Reutov\\_Yu.Yu.\\_035\\_047.pdf](https://dream-journal.org/DREAM_Issue_6_2020_Reutov_Yu.Yu._035_047.pdf)
13. Неразрушающий контроль / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение. – Т. 2. – 2005. – 688 с.