

**Received:** 15.10.2023

**Revised:** 13.12.2023



**Accepted:** 29.12.2023



**DOI:** 10.17804/2410-9908.2023.6.107-120


## A MATRIX EDDY CURRENT TRANSDUCER USING SURFACE MOUNT INDUCTORS

Yu. Ya. Reutov<sup>a), \*</sup>, A. V. Mikhailov<sup>b)</sup>, and L. V. Mikhailov<sup>c)</sup>

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*

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

b)  <https://orcid.org/0000-0001-9342-8986>  [mikhaylov@imp.uran.ru](mailto:mikhaylov@imp.uran.ru);

c)  [mikhaylov\\_lv@imp.uran.ru](mailto:mikhaylov_lv@imp.uran.ru)

\*Corresponding author. Email: [asija1@yandex.ru](mailto:asija1@yandex.ru)

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia  
Tel.: +7 (343) 378-3674

The paper reports the results of testing the by us developed detachable matrix eddy current transducer designed to detect discontinuities on the surface of thin (tens of micrometers) inspected conductive objects, in particular, electrically conductive coatings of aircraft fuel tanks. The transducer can be useful for other applications, e.g. magnetic tomography. The device consists of 32 miniature inductors series-produced by the electronic industry and allowing you to cover an 80 mm wide band with a 2.5 mm wide test path. The use of inductance coils as magnetic receivers is due to the small thickness of the coatings to be tested. With this thickness, testing is effective only at an operating frequency of hundreds of kilohertz. Otherwise, the sounding magnetic field will not be reflected from the item under inspection. At these frequencies, modern microelectronic magnetic field sensors are inoperable. Scanning was carried out at an operating frequency of about 100 kHz. The scan results were displayed on the monitor of the personal computer. By selecting the operating frequency, the information content of the examination can be increased. The transducer detects the pattern of the copper foil of glass textolite both on the foil side and on the reverse side when the material thickness is 1.5 mm. The foil pattern is also detected through an aluminum foil gasket with a thickness of more than 10  $\mu\text{m}$ . Steel plate surface discontinuities have also been detected, and this can be of interest for in-tube flaw detection. Cheap serial inductors designed for surface mounting take up a minimum of space on the printed circuit board and provide higher inspection resolution compared to coils obtained by printing. The scanning step (2.5 mm) achieved in this device is unique to matrix eddy current transducers. The study demonstrates the practicality and efficiency of using serial miniature inductors in eddy current testing.

**Keywords:** electrically conductive coating, fuel tank, aircraft, surface eddy current transducer, matrix transducer, inductor, surface printed wiring, discontinuity, surface inspection

### Acknowledgment

*The reported study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme Diagnostics, No. 122021000030-1).*

## References

1. GOST 19005-81. The means of the provision of the rocket and rocket-space technology items protection from the static electricity. General requirements for the metallization and earthing. Izdatelstvo Standartov Publ., Moscow, 1981, 38 p.
2. Skvortsov, B.V., Samsonov, A.S., Borminskiy, S.A., and Zhivonosnovskaya, D.M. Theoretical basics for inspection of conducting coatings in aircraft fuel tanks. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, 53 (5), 378–386. DOI: 10.1134/S1061830917050084.
3. Skvortsov, B.V., Samsonov, A.S., Borminskiy, S.A., and Zhivonosnovskaya, D.M. Device for conductive coatings quality control of rocket and space technique elements. *Pribery i Metody Izmereniy*, 2019, 10 (1), 23–31. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31. (In Russian).
4. Samsonov, A.S., Blinov, D.I., Skvortsov, B.V., and Zhivonosnovskaya, D.M. Metrological analysis of a device for nondestructive control of flight vehicle fuel tank current conductive coatings. *Vestnik Samarskogo Universiteta, Aerokosmicheskaya Tekhnika, Tekhnologii i Mashinostroenie*, 2017, 16 (3), 197–207. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-197-208. (In Russian).
5. Skvortsov, B.V., Pertsovich, A.S., and Zhivonosnovskaya, D.M. Analysis of the error of the simulator of signature of a thermal object. *Optophysical Measurements*, 2019, 62, 434–441. DOI: 10.1007/s11018-019-01689-9.
6. Sukhanov, D. and Zavyalova, K. Method of multi-angle transmission radiowave tomography of dielectric objects. *Applied Sciences*, 2020, 10 (9), 3270. DOI: 10.3390/app10093270.
7. Eissa, M. and Sukhanov, D.Ya. Design and analysis of multiple-input multiple output (MIMO) system for research purposes. *Doklady TUSUR*, 2022, 25 (2), 22–28. DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-2-22-28. (In Russian).
8. Sukhanov, D.Ya., Goncharik, M.A. Remote control of inductive currents by a system of magnetic coils. *Izvestiya Vuzov. Fizika*, 2012, 55, 8 (2), 159–162. (In Russian).
9. Sukhanov, D.Ya., Berzina, E.S. Magnetic introscopy using array of magnetic field sensors. *Izvestiya Vuzov, Fizika*, 2013, 56, 8 (2), 24–27. (In Russian).
10. Sukhanov, D.Ya. and Goncharik, M.A. Determination of the shape of an electrically conductive object by remote measurements of disturbances of an alternating magnetic field. *Izvestiya Vuzov, Fizika*, 2013, 56, 8 (2), 41–43. (In Russian).
11. Sukhanov, D.Ya. and Sovpel, E.S. A Magnetic induction introscope for flaw detection of metal objects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, 51 (5), 308–314. DOI: 10.1134/S1061830915050095.
12. Dyakin, V.V. and Sandovsky, V.A. *Teoriya i raschet nakladnykh vikhretokovykh preobrazovatelei* [Theory and Calculation of Attached Eddy-Current Transducers]. Nauka Publ., Moscow, 1981, 136 p. (In Russian).
13. Klyuev, V.V., ed. *Nerazrushayushchiy kontrol* [Non-Destructive Testing, vol. 2]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 2005, 688 p. (In Russian).
14. Reutov, Yu.Ya. Laid-on eddy current transducer field penetration depth into a studied object. *Elektrichestvo*, 2018, 4, 50–57. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-4-50-57. (In Russian).
15. Loskutov, V.E. *Magnitnyi defektoskop dlya obnaruzheniya prodolnykh treshchin v magistralnykh gazoprovodakh* [Magnetic Flaw Detector for Detecting Longitudinal Cracks in Gas Main Pipelines: Cand. Thesis]. Ekaterinburg, 2004, 117 p. (In Russian).
16. Reutov, Yu.Ya. A peculiarity of the magnetization of a ferromagnet by an alternating field. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, 6, 35–47. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.6.035-047. Available at: [http://dream-journal.org/issues/content/article\\_313.html](http://dream-journal.org/issues/content/article_313.html)
17. Zhou, Q., Li, G., Hou, K., Cao, F., and Song, K. Design and experimental study of array eddy current sensor for internal inspection of natural gas pipeline. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2113 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/2113/1/012006.
18. Butyrin, P.A., Dubitskii, S.D., and Korovkin, N.V. The use of computer modeling in teaching the electromagnetic field theory. *Elektrichestvo*, 2014, 10, 66–71. (In Russian).

19. Nikitin, A.V., Mikhailov, A.V., Gobov, Yu.L., Kostin, V.N., Smorodinskii, Ya.G. Verification of a technique for reconstructing the shape of defects in soft magnetic ferromagnets using MFL data. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, 58 (11), 1111–1117. DOI: 10.1134/S1061830922700036.

Подана в журнал: 15.10.2023

УДК 620.179.147



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.107-120



## МАТРИЧНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКТИВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Ю. Я. Реутов<sup>a),\*</sup>, А. В. Михайлов<sup>b)</sup>, Л. В. Михайлов<sup>b)</sup>

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки*

*Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. С. Ковалевской, д. 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия*

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

b)  <https://orcid.org/0000-0001-9342-8986>  [mikhaylov@imp.uran.ru](mailto:mikhaylov@imp.uran.ru);

c)  [mikhaylov\\_lv@imp.uran.ru](mailto:mikhaylov_lv@imp.uran.ru)

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

Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, д. 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

Тел: +7 (343) 378-36-74

Описываются результаты испытаний разработанного авторами матричного накладного вихретокового преобразователя, предназначенного для выявления нарушений сплошности поверхности тонких (десятки микрометров) контролируемых проводящих объектов, в частности, электропроводящих покрытий топливных баков летательных аппаратов. Преобразователь может быть полезен и для других применений, например, в магнитной томографии. Устройство состоит из 32 миниатюрных катушек индуктивности, серийно выпускаемых электронной промышленностью, позволяющих охватить контролем полосу шириной 80 мм с шириной дорожки контроля 2,5 мм. Применение в качестве магнитоприемников катушек индуктивности обусловлено малой толщиной контролируемых покрытий. При такой толщине контроль эффективен только при рабочей частоте в сотни килогерц. В противном случае зондирующее магнитное поле не «отразится» от объекта контроля. На таких частотах современные микроэлектронные сенсоры магнитного поля неработоспособны. Сканирование осуществлялось на рабочей частоте около 100 кГц. Результаты сканирования выводились на монитор персонального компьютера. Подбором рабочей частоты можно повысить информативность обследования. Преобразователь выявляет рисунок медной фольги стеклотекстолита как со стороны фольги, так и с обратной стороны при толщине материала 1,5 мм. Рисунок фольги выявляется и через прокладку алюминиевой фольги толщиной более 10 мкм. Выявлены и нарушения сплошности поверхности стальной плиты, что может оказаться полезным во внутритрубной дефектоскопии. Дешевые серийные катушки индуктивности, предназначенные для поверхностного монтажа, занимают минимум места на печатной плате и обеспечивают большую разрешающую способность обследования по сравнению с катушками, получаемыми печатной технологией. Достигнутый в данном устройстве шаг сканирования (2,5 мм) является уникальным для матричных вихретоковых преобразователей. Показана целесообразность и эффективность применения серийных миниатюрных катушек индуктивности в вихретоковом контроле.

**Ключевые слова:** электропроводящее покрытие, топливный бак, летательный аппарат, накладной вихретоковый преобразователь, матричный преобразователь, катушка индуктивности, поверхностный печатный монтаж, нарушение сплошности, контроль поверхности

## 1. Введение

В современной технике существует потребность в выявлении нарушений сплошности тонких токопроводящих покрытий на немагнитных непроводящих поверхностях. Например, пластиковые топливные баки летательных аппаратов [1] содержат напыленные проводящие покрытия, предотвращающие появление на их внешних поверхностях зарядов статического электричества. Эти покрытия имеют надежную гальваническую связь с корпусом летательного аппарата и обеспечивают стекание электрических зарядов с поверхности бака. В процессе эксплуатации возможны нарушения сплошности такого покрытия с образованием изолированных островков, что может привести к появлению электрических разрядов, чреватых возгораниями топливных баков. По данной причине необходима [2–5] периодическая проверка сплошности таких покрытий, зачастую недоступных для визуального наблюдения из-за наличия поверх них непроводящего защитного слоя. Существуют и другие области техники [6–11], в которых такие проверки необходимы.

В большинстве случаев желательно обеспечить максимальную локальность обследования, для чего необходимы сенсоры физических величин (например, индукции магнитного поля) минимальных геометрических размеров. Такие сенсоры могут объединяться в линейки, охватывающие всю ширину обследуемого изделия и поступательно перемещаемые вдоль него (осуществляется обследование всей поверхности). Если такие линейки объединить в матрицу, то можно охватить обследованием поверхность изделия, вообще не прибегая к каким-либо перемещениям. Во многих случаях это немаловажно.

Как бы то ни было, требуются не только минимальные размеры самих сенсоров, но и возможности их компактного размещения рядом друг с другом. Для этого необходимо, чтобы каждый сенсор обладал минимальным количеством выводов, обеспечивающих его нормальное функционирование. В противном случае потребуется увеличение площади печатной платы (даже многослойной), необходимой для полноценной связи сенсора с остальными компонентами электронной схемы, что чревато уменьшением реально достижимой плотности размещения сенсоров.

Известны успешные попытки обнаружения нарушений сплошности токопроводящих покрытий с использованием емкостных сенсоров [2–4]. Такой путь решения задачи является перспективным, но не единственным. Альтернативой ему может служить использование накладных вихретоковых преобразователей [12–13], объединенных в матрицу (или хотя бы в линейку). У каждого из этих путей имеются свои достоинства и недостатки. Очевидно, что отдать предпочтение какому-то из них можно лишь по результатам практического использования.

Одной из первых попыток применения для этих целей накладного матричного вихретокового преобразователя можно считать работу [17], в которой использовались плоские катушки индуктивности, выполненные по технологии печатного монтажа. Существенным ограничением здесь, как и в работах [9–11], явились трудности уменьшения габаритов катушек при приемлемых числах витков, вследствие чего не удалось достигнуть желаемой детализации обследования (дискретность не менее 10 мм).

Описанию результатов поисков возможностей создания накладных вихретоковых преобразователей с максимальной плотностью размещения в матричных устройствах контроля и посвящена предлагаемая статья.

## 2. Материал и методика

### 2.1. Выбор сенсоров переменного магнитного поля

Существует два варианта построения матричных накладных вихретоковых преобразователей:

а) общий источник переменного магнитного поля, охватывающий всю площадь размещения сенсоров поля, в сочетании с множеством этих сенсоров, воспринимающих вторичные поля, возникающие на локальных участках обследуемой поверхности, и образующих тем самым единый вихретоковый преобразователь;

б) применение множества отдельных параметрических накладных вихретоковых преобразователей, сочетающих функции источников и сенсоров переменного магнитного поля. В данной статье обсуждается второй из указанных вариантов.

Характерной особенностью напыленных токопроводящих покрытий является их малая толщина (единицы и десятки микрометров) и ограниченная удельная электропроводность (20–55 МСм/м).

Если воспользоваться общеизвестной формулой расчета глубины проникновения  $a$  переменного магнитного поля в проводящее полупространство [14]

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

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала полупространства,  $\sigma$  – его удельная электропроводность и  $f$  – частота переменного поля, то для алюминиевого покрытия с  $\mu = 1$  и  $\sigma = 27$  МСм/м при частоте  $f = 100$  кГц получаем  $a = 24$  мкм. То есть частота переменного поля, применяемого для контроля нарушений сплошности интересующих нас покрытий вихретоковым методом, ориентировочно должна составлять сотни кГц. Применение полей меньших частот окажется неэффективным, поскольку они будут слабо отражаться контролируемым покрытием.

Известны примеры использования микросхемных сенсоров магнитного поля, основанных на эффекте Холла, объединенных в линейку из тысячи таких сенсоров, отстоящих друг от друга на 5 мм и осуществляющих обследование внутренней поверхности магистральных газопроводов по всей окружности трубы диаметром 1,5 метра по методу MFL [15].

Такие сенсоры типа SS495 имеют по три вывода, два из которых обеспечивают питание сенсора постоянным током, а третий выдает информацию в виде постоянного напряжения об индукции и полярности действующего на него магнитного поля. Указанные сенсоры реагируют на индукцию магнитного поля в диапазоне частот от нуля до нескольких тысяч герц. Верхняя граница рабочего диапазона обусловлена свойствами операционного усилителя, примененного в микросхеме сенсора. Такую же верхнюю границу частотного диапазона имеют и более чувствительные сенсоры [1].

Для получения возможности обследовать изделия на более высоких частотах магнитного поля можно применить миниатюрные индукционные катушки, что сделано в работах [8–11]. Достоинством таких сенсоров переменного магнитного поля, наряду с повышенными рабочими частотами (практически неограниченными), является минимальное количество выводов. Их всего два, причем один из них общий («земляной»), что существенно упрощает соединение сенсора с остальной электронной схемой. При этом катушка может сочетать в себе как функцию создания переменного магнитного поля, так и функцию восприятия реакции локального участка обследуемой проводящей поверхности на воздействие этого поля.

Вместе с тем, для обеспечения приемлемого потокосцепления с обследуемым объектом, такая локальная катушка, при минимальных внешних размерах, должна иметь достаточное количество витков, что непросто осуществить даже в многослойной печатной плате. По этой причине изготовление таких катушек печатным способом проблематично, и более подходящим является применение дискретных катушек в виде самостоятельных изделий, устанавливаемых на печатную плату посредством поверхностного монтажа. Поскольку для синтеза линейки, а тем более матрицы сенсоров, требуются десятки и сотни одинаковых миниатюрных катушек, постольку их кустарное индивидуальное изготовление неприемлемо.

Здесь описывается опыт использования дискретных катушек индуктивности, выпускаемых в больших количествах современной электронной промышленностью и широко доступных при невысокой цене, в линейке дискретных накладных вихретоковых преобразователей для выявления локальных неоднородностей на металлических поверхностях.

## 2.2. Выбор катушек индуктивности, пригодных для использования

Среди широкого ассортимента миниатюрных катушек индуктивности, предназначенных для поверхностного монтажа и выпускаемых современной электронной промышленностью, внимание авторов привлекли катушки марки LQH32MN101K23L типоразмера 1210 на ферритовых сердечниках, обладающие индуктивностью 100 мкГн при габаритах 3,2×2,5×2 мм. На рис. 1 видны контактные площадки для пайки катушки на печатную плату.

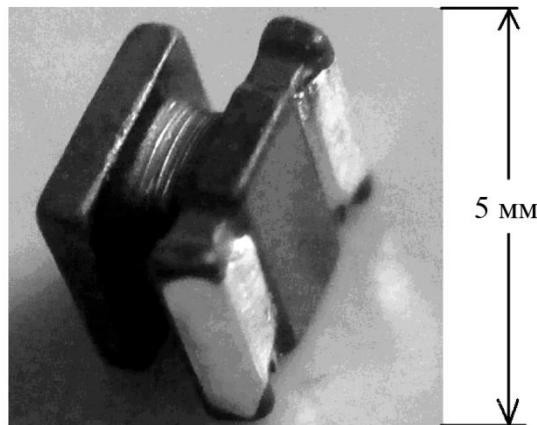


Рис. 1. Миниатюрная катушка индуктивности

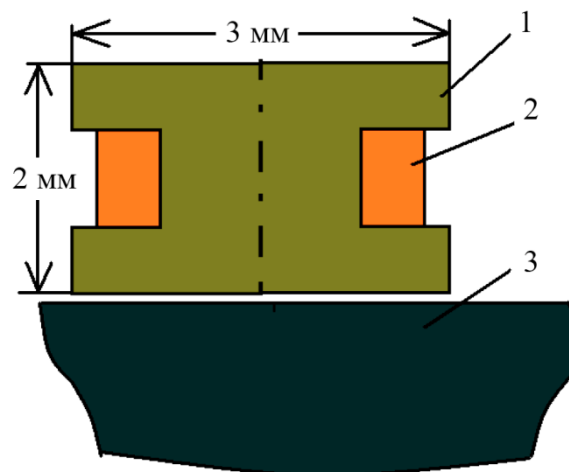


Рис. 2. Эскиз накладного вихретокового преобразователя:  
1 – ферритовый сердечник; 2 – обмотка катушки; 3 – объект контроля

Такая катушка, смонтированная на печатную плату, образует миниатюрный накладной вихретоковый преобразователь, создающий в контролируемом изделии локальное намагничивающее переменное поле, ориентированное (в первом приближении) перпендикулярно к его поверхности [14]. Она же преобразует реакцию локального участка проводящей поверхности объекта контроля на переменное магнитное поле в электрический сигнал. Ферритовый сердечник здесь служит не только магнитопроводом, но и каркасом катушки, а также ее несущей конструкцией (рис. 2).

Принимая решение об использовании такой катушки в качестве накладного вихретокового преобразователя, необходимо было выяснить, как форма используемого ферритового магнитопровода скажется на его функционировании. Ведь щечки магнитопровода частично замыкают поток магнитной индукции, создаваемый обмоткой катушки. Было выполнено численное моделирование такой конфигурации катушки в программе Elcut [18]. Эскиз модели показан на рис. 3.

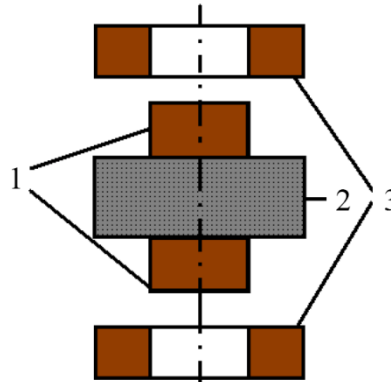


Рис. 3. Эскиз накладного преобразователя при численном моделировании

На нем 1 – ферритовый цилиндрический стержень длиной 20 мм и диаметром 6 мм. Относительная магнитная проницаемость материала стержня принята равной 1000. На стержень нанесена намагничивающая обмотка 2 внешним диаметром 12 мм и длиной 11 мм. Обмотка содержит 100 витков, и по ней пропускается постоянный ток силой 10 мА. На концы стержня могут надеваться две ферритовые шайбы 3 внешним диаметром 12 мм и толщиной 4 мм. Проницаемость материала шайб также принята равной 1000. С помощью этих шайб моделировалось наличие ферритовых щечек сердечника моделируемой катушки (см. рис. 2).

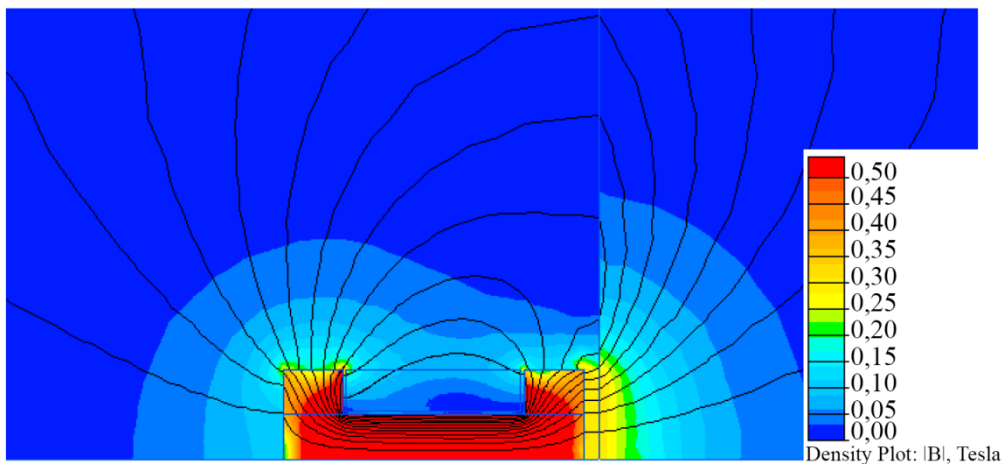


Рис. 4. Распределение магнитной индукции по сечению катушки и стального образца

В отсутствии ферритовых шайб вычисляли поток магнитной индукции через среднее сечение ферритового сердечника в свободном состоянии и при поднесении к его торцу отрезка стального цилиндра диаметром 100 мм и длиной 50 мм с зазором в 1 мм. Проницаемость материала цилиндра также была задана равной 1000. Моделирование показало, что поднесение к устройству стального цилиндра вызывает увеличение потока индукции через сердечник в 1,27 раза. При надевании (условном) ферритовых шайб на концы сердечника



поднесение к его торцу такого же стального цилиндра вызывало приращение потока в 1,34 раза. Результаты моделирования в программе Elcut представлены на рис. 4.

Таким образом, численное моделирование показало, что наличие у ферритового сердечника замыкающих щечек не ухудшает его способности реагировать на приближение ферромагнитного изделия. С учетом результатов моделирования решающими факторами при решении использовать такую катушку в качестве вихретокового преобразователя явились ее миниатюрные размеры и широкая доступность.

### 2.3. Схема вихретокового преобразователя

Выбранная катушка была включена в состав частото задающего контура осциллятора, схема которого показана на рис. 5. Катушка на рисунке имеет обозначение L. Частота прямоугольных импульсов на выходе осциллятора Out соответствует частоте колебаний контура с катушкой L и меняется с изменением электромагнитных характеристик изделия, к поверхности которого она приложена. Измеряя частоту этих колебаний, можно получить представление об электромагнитных свойствах объекта контроля.

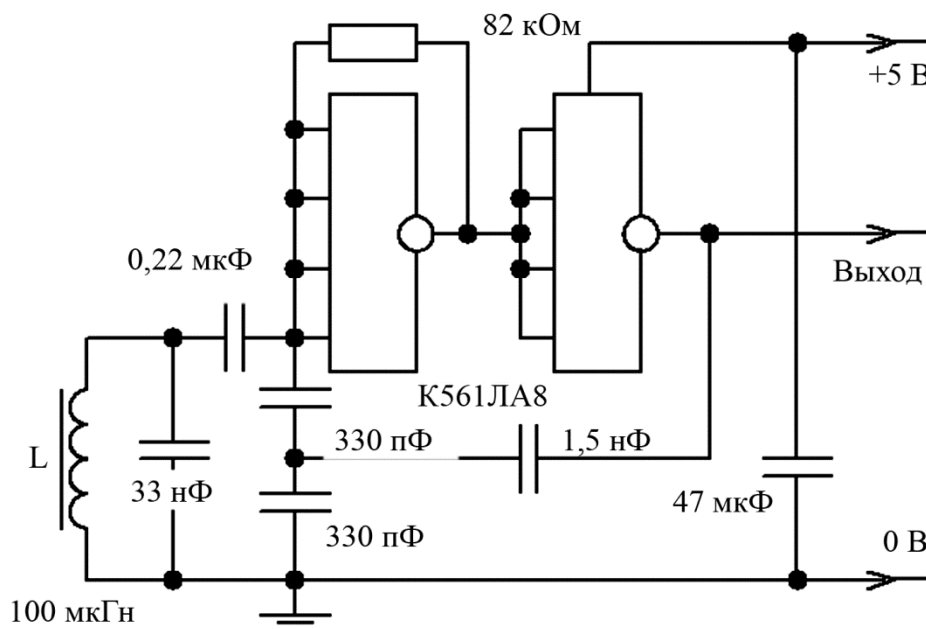


Рис. 5. Электронная схема накладного вихретокового преобразователя

### 2.4. Матрица вихретоковых преобразователей

Выбранные миниатюрные катушки индуктивности методом поверхностного монтажа объединены в две линейки накладных вихретоковых преобразователей по 16 штук в каждой на плате из фольгированного стеклотекстолита размерами 100×24 мм и толщиной 0,5 мм. Расстояние между соседними катушками в линейке составляет 5 мм. Параллельно первой линейке на расстоянии 5 мм от нее расположена вторая такая же линейка, но сдвинутая относительно первой на 2,5 мм по горизонтали (согласно рис. 6). Тем самым эти две линейки образуют матрицу накладных вихретоковых преобразователей, позволяющих при поступательном перемещении поперек линеек охватить обследованием полосу поверхности объекта контроля шириной 80 мм тридцатью двумя дорожками шириной по 2,5 мм каждая.



Рис. 6. Матрица вихретоковых преобразователей

В непосредственной близости к катушкам на плате смонтированы 32 ключевых транзистора IRLML2502 типоразмера 805. Эти транзисторы в обусловленном порядке включают в состав колебательного контура осциллятора по рис. 5 соответствующую катушку индуктивности, обеспечивая последовательное функционирование каждого из тридцати двух миниатюрных вихретоковых преобразователей. Частота колебаний (порядка 100 кГц), генерируемых вихретоковым преобразователем, измерялась и отправлялась микроконтроллером в последовательный порт персонального компьютера. Этот же микроконтроллер обеспечивал поочередную подачу на переключательные транзисторы отпирающих импульсов.

### 2.5. Установка для измерений

Разработанный для выполнения измерений программно-аппаратный комплекс [19] состоит из двухосевой механики с шаговыми двигателями лазерного гравера с числовым программным управлением на базе платы с микроконтроллером для обеспечения точного перемещения матрицы вихретоковых преобразователей с управляющей ею платой с микроконтроллером, персонального компьютера (ПК) и программного обеспечения (ПО). Схема оборудования представлена на рис. 7.

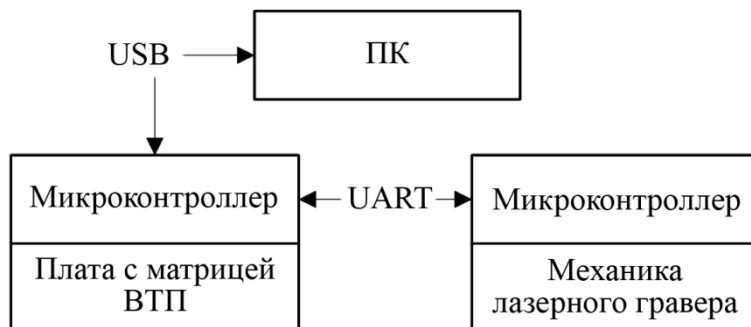


Рис. 7. Схема измерительной установки

В микроконтроллер платы гравера была загружена распространяемая под лицензией GPLv3 прошивка GRBL, которая предоставляет интерфейс управления движением посредством отправки в интерфейс UART микроконтроллера команд G-code. Вместо лазера к каретке гравера был прикреплен алюминиевый профиль, на конце которого располагалась плата матрицы вихретоковых преобразователей с управляющей ею платой с микроконтроллером.

Разработанная прошивка для микроконтроллера, связанного с ПК по USB, получает два типа команд для управления функциональностью оборудования. Первая команда включает конкретную катушку, измеряет и возвращает в ответ частоту тока, протекающего по ней. Вторая команда служит для перенаправления G-code микроконтроллеру управления механикой через встроенный в плату UART. Программное обеспечение для управ-

ления установкой позволяет подключаться к плате, отправлять команды, получать ответ на них, задавать настройки измерения, следить за процессом измерения в реальном времени при помощи вывода тепловой карты, а также сохранять результаты измерения в файл для дальнейшей обработки. Перед началом измерения проводится калибровка: измеряются частоты для каждой катушки в воздухе, эти показания записываются в память и затем используются во время измерения для вычитания этих значений из измеренных над поверхностью исследуемого объекта.

### 3. Результаты и обсуждение

Для проведения исследований была изготовлена печатная плата 90×180 мм с надписью из медной фольги (рис. 8 *a*). Толщина текстолитовой пластины составляла 1,5 мм, толщина медной фольги – 35 мкм. Высота шрифта равнялась 35 мм. Сканирование проводили в контакте обратной стороны платы матрицы вихретоковых преобразователей с поверхностью платы с надписью.

Данная плата сканировалась со стороны меди и с обратной стороны, а также со стороны меди, скрытой листами алюминиевой фольги. Толщина фольги составляла 17 мкм.

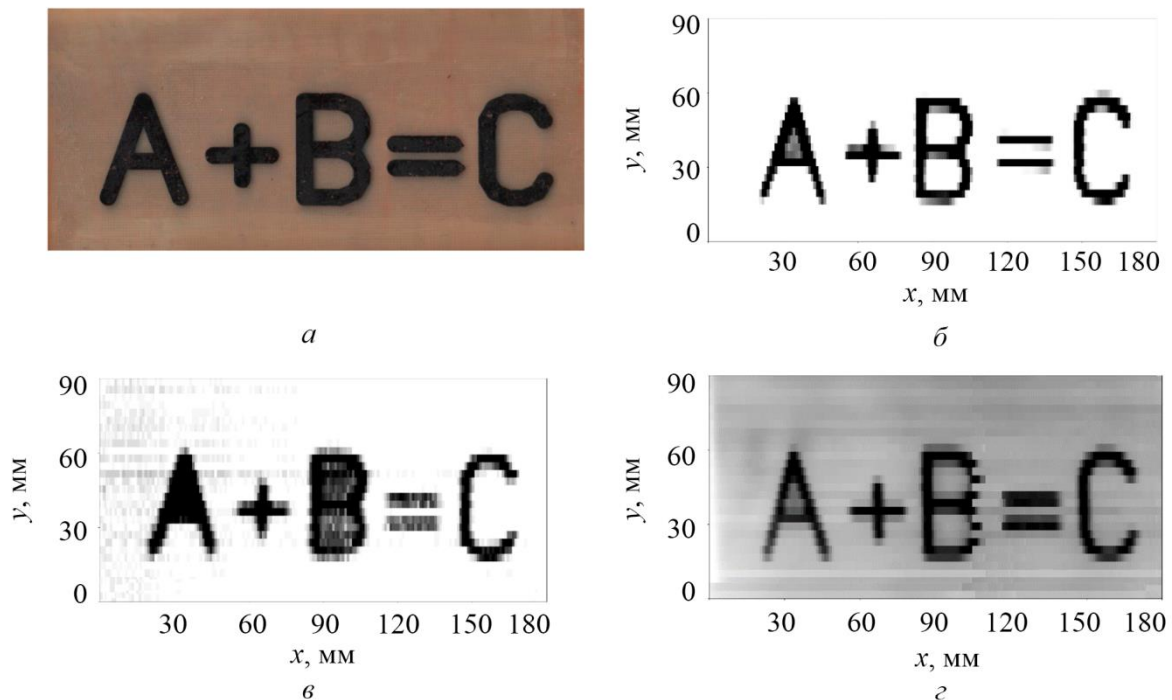


Рис. 8. Изображения результатов сканирования платы с надписью (*a*), полученные со стороны меди (*б*), со стороны стеклотекстолита (*в*) и со стороны меди под листом алюминиевой фольги (*г*)

Из рисунка видно, что увеличение расстояния между преобразователем и сканируемой поверхностью от полутора до двух миллиметров, а также помещение между ними проводящей прокладки из алюминия несущественно влияют на результат сканирования. Видно также, что результат сканирования слабо зависит от взаимной ориентации направления движения матрицы преобразователей при сканировании и направлением линий сканируемого шрифта.

Особый интерес представляет результат эксперимента, при котором медный слой был закрыт листами алюминиевой фольги толщиной 17 мкм. Электрический контакт алюминия с медью при этом был исключен. При частоте порядка 100 кГц медный слой хорошо различим

за одним листом фольги. При увеличении количества листов фольги с одного до пяти наблюдалось постепенное ухудшение выявляемости рисунка медного слоя.

Также подвергали сканированию стальную плиту размером 166×60×6 мм с пятью фрезерованными щелями с раскрытием 0,5 мм и глубинами от 0,5 до 2,5 мм посередине плиты (рис. 9).

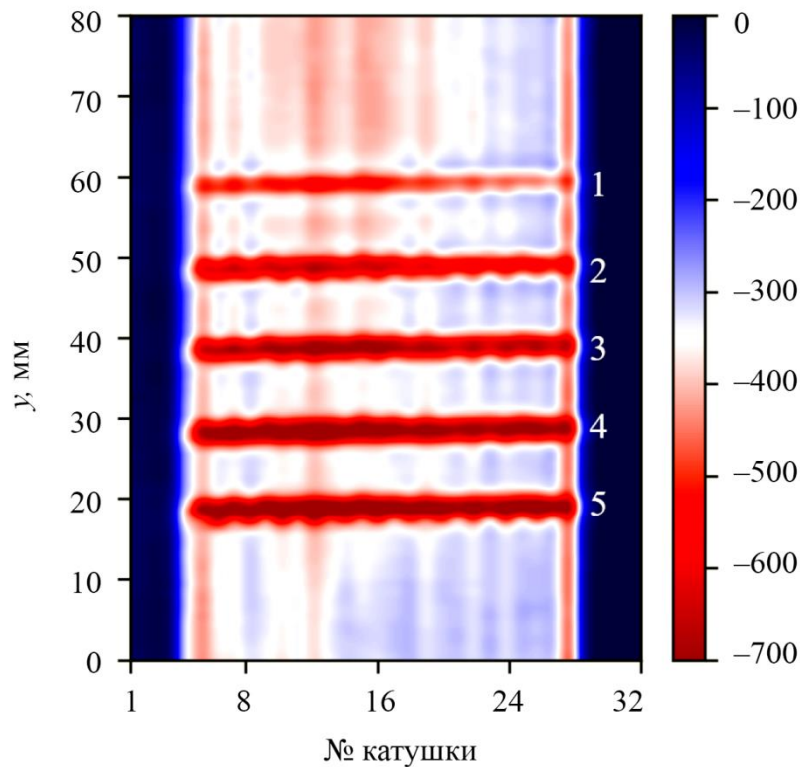


Рис. 9. Результаты сканирования поверхности образца ферромагнитной стали со щелями разных глубин: 1 – 0,5 мм; 2 – 1 мм; 3 – 1,5 мм; 4 – 2 мм; 5 – 2,5 мм

На рис. 9  $y$  – расстояние от нижнего края пластины, а на цветной линейке справа – отклонение частоты осциллятора (Гц), соответствующее цвету. Из рисунка видно, что возможно сканирование и ферромагнитных изделий. При этом наблюдается расширение полученных изображений щелей по мере нарастания их глубины, что в некоторых случаях может оказаться информативным.

#### 4. Заключение

Экспериментально проверены возможности использования выпускаемых радиоэлектронной промышленностью миниатюрных катушек индуктивности для создания матриц накладных вихретоковых преобразователей.

Численным моделированием установлено, что наличие технологических выступов на ферритовом сердечнике катушки не ухудшает реакцию вихретокового преобразователя на дефект сплошности.

Изготовлена и испытана матрица для обнаружения нарушений сплошности поверхности металлических покрытий толщиной в десятки микрометров с шириной полосы сканирования 80 мм при шаге сканирования по ширине 2,5 миллиметра.

Нарушения сплошности обнаруживаются при зазоре между матрицей преобразователей и сканируемой поверхностью до двух миллиметров, а также через слой алюминиевой фольги толщиной в два-три десятка микрометров.

Показана возможность обнаружения матрицей нарушений сплошности поверхности не только диамагнитных, но и ферромагнитных объектов контроля.

Результаты исследования могут быть полезны, в частности, при дефектоскопии токопроводящих покрытий топливных баков летательных аппаратов.

Имеется возможность увеличения информативности контроля выбором частоты колебаний осциллятора благодаря изменениям глубины проникновения зондирующего магнитного поля.

Достигнутый в данном устройстве шаг сканирования (2,5 мм) является уникальным для современных матричных вихретоковых преобразователей.

### Благодарность

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

### Литература

1. ГОСТ 19005–81. Средства обеспечения защиты изделий ракетной и ракетно-космической техники от статического электричества. Общие требования к металлизации и заземлению. – М. : Издательство стандартов, 1981. – 38 с.
2. Theoretical basics for inspection of conducting coatings in aircraft fuel tanks / B. V. Skvortsov, A. S. Samsonov, S. A. Borminskiy, D. M. Zhivonosnovskaya // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53 (5). – P. 378–386. – DOI: 10.1134/S1061830917050084.
3. Устройство контроля качества токопроводящих покрытий элементов ракетно-космической техники / Б. В. Скворцов, А. С. Самсонов, С. А. Борминский, Д. М. Живоносная // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 23–31. – DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31.
4. Метрологический анализ устройства неразрушающего контроля токопроводящих покрытий топливных баков летательных аппаратов / А. С. Самсонов, Д. И. Блинов, Б. В. Скворцов, Д. М. Живоносная // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 197–207. – DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-197-208.
5. Skvortsov B. V., Pertsovich A. S., Zhivonosnovskaya D. M. Analysis of the error of the simulator of signature of a thermal object // Optophysical Measurements. – 2019. – Vol. 62. – P. 434–441. – DOI: 10.1007/s11018-019-01689-9.
6. Sukhanov D., Zavyalova K. Method of multi-angle transmission radiowave tomography of dielectric objects // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10 (9). – P. 3270. – DOI: 10.3390/app10093270.
7. Исса М., Суханов Д. Я. Разработка и анализ системы с множеством излучателей и множеством приёмников для исследовательских целей // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 2. – С. 22–28. – DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-2-22-28.
8. Суханов Д. Я., Гончарик М. А. Дистанционное управление индукционными токами // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8 (2). – С. 159–162.
9. Суханов Д. Я., Берзина Е. С. Магнитная интроскопия с использованием решётки датчиков магнитного поля // Известия вузов, Физика. – 2013. – Т. 56, № 8 (2). – С. 24–27.
10. Суханов Д. Я., Гончарик М. А. Определение формы электропроводящего объекта по дистанционным измерениям возмущений переменного магнитного поля // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8 (2). – С. 42–44.
11. Sukhanov D. Ya., Sovpel E. S. A magnetic induction introscope for flaw detection of metal objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51 (5). – P. 308–314. – DOI: 10.1134/S1061830915050095.
12. Дякин В. В., Сандовский В. А. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М. : Наука, 1981. – 136 с.

13. Неразрушающий контроль / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2005. – 688 с. – Т. 2
14. Реутов Ю. Я. Глубина проникновения в изделие поля накладного вихретокового преобразователя // *Электричество*. – 2018. – № 4. – С. 50–57.
15. Лоскутов В. Е. Магнитный дефектоскоп для обнаружения продольных трещин в магистральных газопроводах : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.11. – Екатеринбург, 2004. – 117 с.
16. Reutov Yu. Ya. A peculiarity of the magnetization of a ferromagnet by an alternating field // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2020. – Iss. 6. – P. 35–47 – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.6.035-047. – URL: [http://dream-journal.org/issues/content/article\\_313.html](http://dream-journal.org/issues/content/article_313.html)
17. Design and experimental study of array eddy current sensor for internal inspection of natural gas pipeline / Q. Zhou, G. Li, K. Hou, F. Cao, K. Song // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2113. – P. 012006. – DOI:10.1088/1742-6596/2113/1/012006.
18. Бутырин П. А., Дубицкий С. Д., Коровкин Н. В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля // *Электричество*. – 2014. – № 10. – С. 66–71.
19. Verification of a technique for reconstructing the shape of defects in soft magnetic ferromagnets using MFL data / A. V. Nikitin, A. V. Mikhailov, Yu. L. Gobov, V. N. Kostin, Ya. G. Smorodinskii // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2022. – Vol. 58 (11). – P. 1111–1117. – DOI: 10.1134/S1061830922700036.