

## МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ОСЦИЛЛИСТОРНОГО ЭФФЕКТА

Одним из наиболее распространенных видов неразрушающего контроля является магнитный контроль, при проведении которого используются различные аналоговые магнитоизмерительные первичные измерительные устройства: феррозондовые, на основе эффектов Гаусса и Холла и др.

Перспективным направлением исследований в области неразрушающего контроля и технической диагностики представляется разработка измерительных преобразователей с цифровым выходным сигналом или сигналом, легко преобразующимся в код.

В статье рассматривается магнитоизмерительный преобразователь на основе осциллисторного эффекта, который носит пороговый характер и заключается в возникновении колебаний электрического тока, протекающего по полупроводниковому образцу, помещенному в продольные электрическое и магнитное поля. Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости пороговой напряженности электрического поля от напряженности магнитного поля.

Приведена схема преобразователя, осуществляющего преобразование индукции магнитного поля в число импульсов электрического напряжения и диаграммы его работы.

Чувствительность преобразователя зависит от частоты генератора образцовой частоты и коэффициента преобразования генератора линейно возрастающего напряжения.

**Ключевые слова:** контроль, преобразователь, магнитное поле, напряженность, индукция, осциллистор.

**Введение.** В процессе эксплуатации изделий происходит изменение их свойств. При этом во многих случаях возникают различные дефекты, которые могут приводить к отказам. Для прогнозирования появления и выявления дефектов используются различные средства и методы диагностики и неразрушающего контроля, который является последней технологической операцией, позволяющей выявлять недопустимые дефекты в технических объектах [1]. Неразрушающий контроль (НК) получил широкое применение. В зависимости от физических явлений, положенных в основу, выделяют 9 видов НК [2], которые, в свою очередь, состоят из методов. Одним из наиболее распространенных видов НК является магнитный контроль, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств объекта контроля. Одним из важнейших параметров магнитного поля является напряженность « $H$ », под которой понимается векторная величина, определяемая как величина и направление силы, действующей в данной точке на единичный «магнетик» или на «элемент тока». Вторым параметром магнитного поля является индукция « $B$ » — векторная величина, которая

определяет силу воздействия на перемещающийся электрический заряд (ток) в магнитном поле, направленной в перпендикулярном направлении скорости движения.

Приборы для измерения параметров магнитного поля (магнитометры) можно разделить на две группы: 1) магнитометры для измерения внешних полей, создаваемых объектами; 2) магнитометры для исследования магнитных свойств вещества.

Магнитометры включают в себя первичный измерительный преобразователь (ПИП) и устройство обработки выходного сигнала ПИП. Первичный преобразователь осуществляет преобразование магнитной величины в величину, обычно электрическую (например, напряжение), подающуюся на измерительный прибор (например, вольтметр). Первичные преобразователи магнитных величин называют магнитоизмерительными преобразователями.

В зависимости от принципа действия данные преобразователи можно разбить на несколько групп: феррозондовые; магниторезисторные; преобразователи на эффекте Холла; индукционные; квантовые. Информативным параметром выходного сигнала большинства известных магнитоизмери-

тельных преобразователей является изменение его амплитуды.

В данной работе рассматривается магнитоизмерительный преобразователь на основе осцилляторного эффекта.

**Теория.** Магниторезисторные преобразователи (магниторезисторы) представляют собой резисторы, сопротивление которых изменяется под действием магнитного поля. Действие данных преобразователей основано на эффекте Гаусса [3]. Различают продольный и поперечный эффекты. Изменение сопротивления при продольном эффекте мало. На практике при создании магниторезисторов в основном применяется поперечный эффект.

Так как в проводниках эффект Гаусса проявляется слабо, поэтому в качестве материалов чувствительных элементов магниторезистивных ИП используются полупроводники, из которых наибольшее применение получили антимонид индия ( $InSb$ ) и арсенид индия ( $InAs$ ).

Зависимость сопротивления магниторезистивного ИП от индукции магнитного поля имеет вид [4]:

$$\frac{R_B R_0}{R_0} = \left[ \frac{R_B R_0}{R_0} \right]_{\max} \cdot \frac{\sin^2 \varphi}{1 + (\mu_n \cdot B)^2 \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (1)$$

где  $R_B$  — сопротивление магниторезистивного ИП при воздействии магнитного поля ( $B = B_{\text{НОМ}}$ );  $R_0$  — сопротивление магниторезистивного ИП при отсутствии магнитного поля ( $B = 0$ );  $\mu_n$  — подвижность носителей заряда;  $\varphi$  — угол между векторами напряженности электрического и магнитного полей.

Магниторезистивные преобразователи имеют низкие шумы и характеризуются малым старением. К недостаткам магниторезистивных преобразователей следует отнести низкую чувствительность, нелинейность характеристики преобразования.

Подобные преобразователи позволяют измерять постоянные и переменные магнитные поля до 1 МГц в диапазоне от 1 мТл до 1 Тл [5]. Также они применяются для контроля перемещений объектов, измерения угловой координаты, для построения бесконтактных датчиков тока с гальванической развязкой.

Феррозондовые магниточувствительные преобразователи представляют собой устройство (рис. 1), состоящее из двух ферромагнитных сердечников 1 и 2, имеющих возбуждающие 3 и измерительные 4 обмотки. Принцип действия феррозонда основан на изменении магнитного состояния ферромагнитных сердечников под воздействием двух магнитных полей разных частот [6].

При одновременном воздействии на сердечники 1 и 2 (рис. 1) постоянного измеряемого магнитного поля  $H_x$  и переменного поля  $H$ , создаваемого обмотками возбуждения 3, на измерительных обмотках 4 возникает ЭДС.

Для измерения напряженности постоянного магнитного поля  $H_x$  обмотки возбуждения 3 включаются встречно, а измерительные обмотки 4 — согласно. В случае согласного соединения измерительных обмоток они могут быть заменены одной, охватывающей оба сердечника. В отсутствие измеряемого поля сердечники 1 и 2 перемагничиваются симметрично и на измерительных обмотках возникает напряжение, состоящее из нескомпенсированных нечетных гармоник. Если внешнее магнитное поле не равно нулю и возбуждение осуществляется переменным током синусоидальной формы, сердечни-

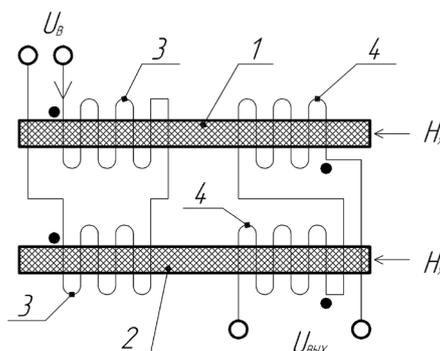


Рис. 1. Феррозондовый преобразователь:  
1 и 2 — ферромагнитный сердечник;  
3 — обмотки возбуждения;  
4 — измерительные обмотки

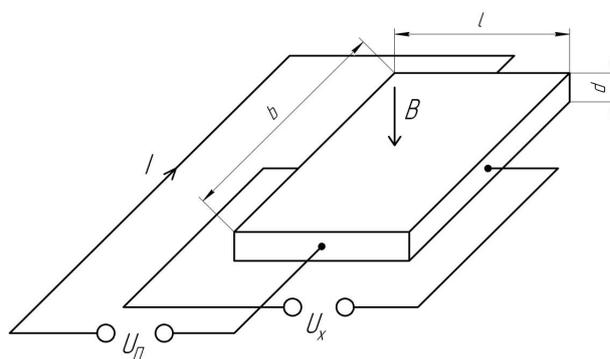


Рис. 2. Преобразователь Холла

ки 1 и 2 перемагничиваются несимметрично. При этом в измерительной обмотке преобразователя наводится напряжение, которое находится по выражению [7]:

$$U(t) = 6sn_{\text{И}}\omega a_3 H_x H_{\text{ВМ}}^2 \sin(2\omega t), \quad (2)$$

где  $s$  — площадь поперечного сечения сердечников,  $\text{мм}^2$ ;  $n_{\text{И}}$  — число витков в измерительной обмотке преобразователя;  $\omega$  — частота тока возбуждения,  $\text{рад/с}$ ;  $H_{\text{ВМ}}$  — амплитуда поля возбуждения;  $a_3$  — третий коэффициент аппроксимации кривой намагничивания.

Таким образом, выходной сигнал феррозондового преобразователя содержит полезную составляющую, пропорциональную измеряемой индукции постоянного магнитного поля только на удвоенной частоте возбуждения  $2\omega$ .

Следует отметить, что полезная информация о значении измеряемого поля содержится и на других четных частотах  $4\omega$  и  $6\omega$ .

На практике в феррозондовых магнитометрах в качестве выходного сигнала в основном используется вторая гармоника, выделяемая с помощью узкополосного фильтра.

Феррозондовые преобразователи работают в полях напряженностью до  $2 \cdot 10^4$  А/м. Чувствительность феррозондовых преобразователей достигает  $10^{-2}$  В/А.

Для измерения индукции магнитного поля широкое применение нашли преобразователи на основе эффекта Холла, который заключается в возникновении поперечной разности потенциалов (ЭДС

Холла) на противоположных боковых гранях пластины, помещенной в магнитное поле  $B$ , при протекании по ней электрического тока  $I$  (рис. 2).

При пропускании через пластину (рис. 2), помещенную в магнитное поле, постоянного тока  $I = \text{const}$  на одной грани пластинки сконцентрируются отрицательные заряды, а на противоположной симметрично расположенной грани сконцентрируются положительные заряды. Между этими зарядами, как между обкладками пластин плоского конденсатора, возникнет электрическое поле напряженностью  $E$ , которое принято называть электрическим полем Холла. Значение ЭДС Холла будет зависеть только от индукции (напряженности) поперечного магнитного поля и может быть найдено по формуле:

$$U_x = \frac{R_x IB}{d} F\left(\frac{l}{b}\right), \quad (3)$$

где  $R_x$  — постоянная Холла;  $d$  — толщина пластины;  $I$  — номинальный ток.

В качестве материалов преобразователей Холла используются полупроводники с высокой подвижностью, например, германий, кремний, арсенид галлия, антимонид индия и др. Преобразователи чаще выполняют в виде пластин прямоугольной или крестообразной формы. Толщина преобразователя составляет десятые доли ( $\approx 0,2$  мм), размеры активной части — единицы миллиметров.

Преимуществами преобразователей Холла являются их малые размеры, малая масса. Они работают как в постоянных, так и в переменных магнитных полях. Диапазон преобразования лежит от тысячных до единиц ( $\sim 2 \cdot 10^{-3} - 2$ ) Тл [8].

Действие квантовых магнитоизмерительных преобразователей основано на взаимодействии ядер молекул вещества с магнитным полем. К таким преобразователям относятся: преобразователи электронного парамагнитного резонанса (ЭПР); ядерные и атомные преобразователи и др.

Квантовые преобразователи характеризуются высокой чувствительностью и точностью. Существенным недостатком является сложность конструкции.

Как отмечено ранее, информативным параметром выходного сигнала большинства используемых на практике магнитоизмерительных преобразователей является изменение его амплитуды, то есть преобразователь представляет собой аналоговое устройство. Это обстоятельство при сопряжении преобразователя с цифровыми устройствами обуславливает необходимость преобразования аналоговой величины (амплитуды) в цифровую. Выходной сигнал преобразуется в цифровой с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), одним из элементов которого является преобразователь «параметр-частота».

Открытие во второй половине XX века ряда «новых» физических эффектов позволяет создать преобразователи, которые осуществляют прямое преобразование измеряемой величины в частоту. Одним из таких эффектов является осцилляторный эффект [9], заключающийся в возникновении в полупроводниковом образце (осцилляторе), помещенном в продольные электрическое и магнитное поля, колебаний электрического тока. Эффект проявляется при превышении напряженностей электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей пороговых значений  $E > E_{\text{п}}$  и  $H > H_{\text{п}}$  и основан на явлении абсо-

лютной винтовой неустойчивости электронно-дырочной плазмы [10].

Частота колебаний тока зависит от значений напряженности электрического и магнитного полей, размеров и параметров электронно-дырочной плазмы образца. Для образца из близкого к собственному полупроводника частота колебаний тока в области слабых магнитных полей пропорциональна магнитной индукции и в линейной области может быть рассчитана по формуле

$$f \cong f_0 + \frac{0,71 D_a (\mu_n - \mu_p)}{a^2} B, \quad (4)$$

где  $f_0$  — составляющая частоты, обусловленная амбиполярным сносом винтового возмущения;  $D_a$  — коэффициент амбиполярной диффузии;  $\mu_n$  и  $\mu_p$  — подвижности электронов и дырок;  $a$  — поперечный размер образца.

Пороговый характер эффекта и зависимость частоты электрических колебаний от индукции магнитного поля позволяют использовать его для построения магнитоизмерительных преобразователей.

Зависимость частоты от индукции магнитного поля позволяет создать преобразователи магнитной индукции и напряженности в частоту электрических колебаний. В работе [11] рассмотрены характеристики преобразователя магнитной индукции в частоту, чувствительный элемент которого выполнен из германия марки ГЭС-45. Чувствительность преобразователя в диапазоне (0,4–1,2) Тл составляет 20 кГц/Тл.

Пороговая напряженность электрического поля  $E_{\text{п}}$  связана с напряженностью магнитного поля  $H$  соотношением [12]:

$$E_{\text{п}} = \frac{7D_a}{m a \mu_m^B B} = \frac{k_1}{H}, \quad (5)$$

где  $\mu_m$  — биполярная подвижность;  $m$  — мода колебаний;  $k_1$  — коэффициент.

При создании электрического поля в образце приложением напряжения к электродам, выполненным на его торцах, пороговая напряженность  $E_{\text{п}}$  может быть выражена в виде:

$$E_{\text{п}} = \frac{U_{\text{п}}}{L},$$

где  $L$  — длина образца.

На рис. 3 показана зависимость порогового напряжения от напряженности магнитного поля для образца из германия марки ГЭС 45, размерами (1×1×4) мм<sup>2</sup>.

Из выражения (3) следует, что, определив пороговое напряжение, можно найти индукцию магнитного поля, в которое помещен образец.

На рис. 4 показана схема преобразователя напряженности магнитного поля в число импульсов и временные диаграммы его работы (рис. 5).

Работает устройство следующим образом. Импульсом  $U_1$  тактового генератора 1 триггер 5 устанавливается в состояние, при котором напряжение  $U_5$  соответствует логической единице. Это напряжение подается на один из входов схемы 6 (схема «И»), на второй вход которой подаются импульсы  $U_7$  с генератора образцовой частоты 7. Эти импульсы  $U_6$  проходят на выход схемы 6. Импульс  $U_1$  также запускает работу генератора 2, формирующего ли-

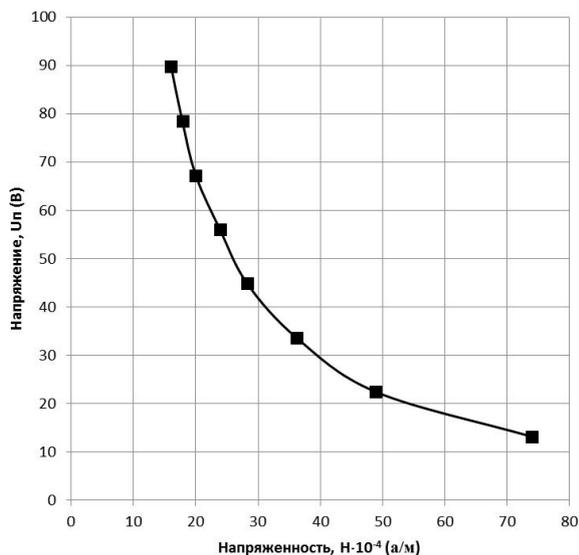


Рис. 3. Зависимость порогового напряжения от индукции магнитного поля

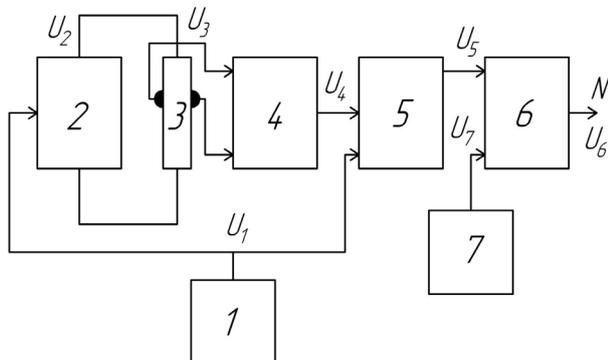


Рис. 4. Преобразователь напряженности магнитного поля в число импульсов:

- 1 — генератор тактовой частоты;  
 2 — генератор линейно нарастающего напряжения;  
 3 — полупроводниковый образец;  
 4 — формирователь импульса; 5 — триггер;  
 6 — схема «И»; 7 — генератор образцовой частоты

нейно нарастающее напряжение  $U_2$ , которое подается на торцевые электроды образца 3. Напряжение создает электрическое поле в образце 3, равное

$$U_2 = k_2 t, \quad (6)$$

где  $k_2$  — постоянный коэффициент;  $t$  — время.

При достижении напряжения порогового значения  $U_{п}$  в образце 3 возникают колебания поперечного потенциала  $U_3$ . С помощью электродов, выполненных на боковых гранях образца, они подаются на вход формирователя импульсов 4. Импульсы  $U_4$  подаются на триггер 5 и устанавливают его в состояние логического нуля. При этом на одном из входов схемы 6 формируется напряжение логического нуля, и прохождение импульсов генератора 7 на выход схемы 6 прекращается.

Число импульсов  $N$  на выходе схемы 6 зависит от частоты  $f_0$  генератора 7 и интервала времени  $T$ :

$$N = T f_0. \quad (7)$$

При выполнении условия  $U = U_{п}$  из выражений (5) – (7) получим:

$$N = \frac{k_2 L f_0}{k_1 H} = S \frac{1}{H}. \quad (8)$$

Выражения (4) и (5) показывают, что значение частоты электрических колебаний и порогового электрического поля зависят от различных факторов: размеров полупроводникового образца; параметров электронно-дырочной плазмы. Изменяя эти величины, можно регулировать чувствительность преобразователя. Например, уменьшение поперечного размера  $a$  с 0,5 мм до 0,3 мм позволяет существенно повысить чувствительность до (40–45) кГц/Тл. Но при этом увеличивается значение пороговой магнитной индукции, т.е. возрастает значение нижнего предела преобразования магнитной индукции.

В преобразователе магнитной индукции в число импульсов регулировка чувствительности осуществляется изменением частоты генератора образцовой частоты и коэффициента преобразования ге-

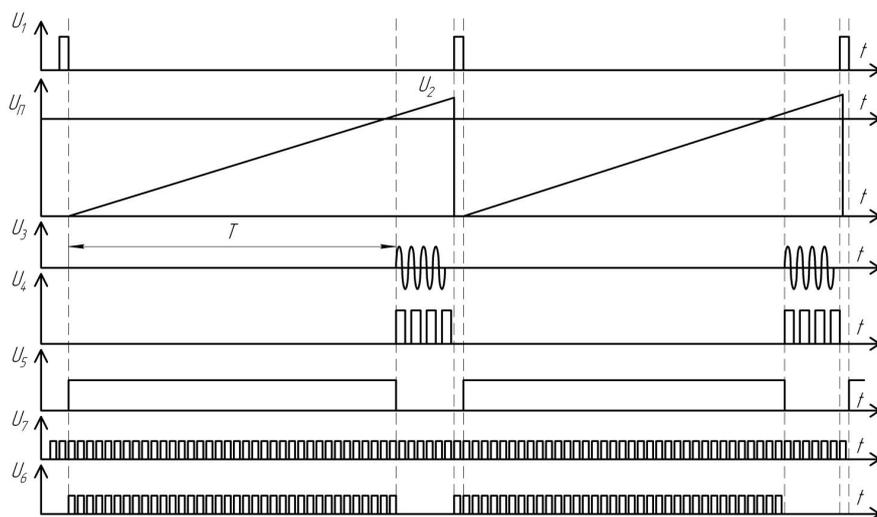


Рис. 5. Временные диаграммы работы преобразователя напряженности магнитного поля в число импульсов

нератора линейно нарастающего напряжения. При этом диапазон преобразования не изменяется.

Рассмотренные магнитоизмерительные преобразователи позволяют измерять индукцию и напряженность однородных магнитных полей.

Важной характеристикой неоднородного магнитного поля является градиент напряженности магнитного поля — производная абсолютной величины напряженности в какой-либо точке поля по направлению наибольшего увеличения напряженности.

Диапазон напряженностей магнитных полей, в которых осуществляется измерение градиента напряженности, лежит в очень широких пределах, от слабых магнитных полей с индукцией  $10^{-13}$  Тл и менее (например, магнитное поле земли  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл) до сверхсильных магнитных полей с индукцией десятки и тысячи тесла (например, поля сверхпроводящих магнитов). Одним из основных элементов градиентометра является первичный измерительный (магнитоизмерительный) преобразователь, в качестве которого могут использоваться магниторезисторные, феррозондовые и другие преобразователи.

В настоящее время наибольшее распространение получили феррозондовые преобразователи. Подобные преобразователи работают в диапазоне слабых магнитных полей и широко применяются в дефектоскопии. В работе [13] описан преобразователь градиента магнитного поля в частоту, для работы в диапазоне сильных магнитных полей, работа которого основана на осциллисторном эффекте.

**Заключение.** Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований зависимости параметров осциллисторов от напряженности магнитного поля показал возможность их использования для построения магнитоизмерительных преобразователей параметров однородных и неоднородных магнитных полей, обладающих достаточно высокой чувствительностью и работающих в сравнительно сильных магнитных полях.

#### Библиографический список

1. Ковшов Е. Е., Косач А. А., Стебулянин М. М. Системный подход к цифровому неразрушающему контролю // Вестник МГТУ Станкин. 2018. № 4. С. 111–114.
2. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Введ. 2020–11–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 12 с.
3. Sadovskov I. D., Zaharov A. A. Sensors Of Magnetic Field Based On Magnetoresistive Effect // 2012 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. 2012. P. 402–408. DOI: 10.1109/Apede.2012.6478090.
4. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника. В 2 т. Москва: ДМК Пресс, 2011. Т. 1. 544 с. ISBN 5-94074-078-2.
5. Ripka P., Janošek M. Advances in magnetic field sensors // IEEE Sensors Journal. 2010. Vol. 10 (6). P. 1108–1116. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2043429.

6. Eren H., Webster J. G. Measurement Instrumentation and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement. New-York: CRC Press, 2014. 3559 с.

7. Баранова В. Е. Измерение слабого магнитного поля на основе феррозондового датчика: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2015. 134 с.

8. Буслов И., Бауткин В., Драпезо А [и др.]. Датчики слабых магнитных полей на эффекте Холла // Современная электроника. 2011. № 1. С. 12–17.

9. Иванов Ю. Л., Рывкин М. Возникновение колебаний тока в образцах германия, помещенных в электрическое и продольное магнитное поле // Журнал технической физики. 1958. Т. 28. С. 54–56.

10. Glikzman M. Instabilities of a cylindrical electron-hole plasma in a magnetic field // Phys. Rev. 1961. Vol. 124. P. 1655–1664.

11. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V. Metrological characteristics of measuring converters based on oscillistor effect // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818993.

12. Hurwitz C. E., McWhorter A. L. Growing helical density waves in a semiconductor plasmas // Physical Review Letters. 1964. Vol. 134 (4A). P. 1033–1050. DOI: 10.1103/PhysRev.134.A1033.

13. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V., Akhmedzhanov R. A., Korenev E. O. Magnetically sensitive converter of the magnetic field gradient based on oscillistor // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2017. P. 1–3. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239443.

**ЧЕРЕДОВ Александр Иванович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6957-1660

AuthorID (РИНЦ): 471995

**ЩЕЛКАНОВ Андрей Владимирович**, старший преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2564-1461

AuthorID (SCOPUS): 56447045400

ORCID: 0000-0002-1354-8708

ResearcherID: P-9053-2015

Адрес для переписки: shchelkanov@omgtu.ru

#### Для цитирования

Чередов А. И., Щелканов А. В. Магнитоизмерительный преобразователь на основе осциллисторного эффекта // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 96–100. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-96-100.

Статья поступила в редакцию 10.10.2022 г.

© А. И. Чередов, А. В. Щелканов