

УДК 537.862
EDN: LCKRFO

PACS: 41.20.Gz

**Обнаружение потенциального электрического поля,
индуцированного тороидом с низкочастотным током**© А. К. Томилин^{1*}, И. Мисюченко², В. С. Викулин³¹ *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР),
г. Томск, 634050 Россия*** E-mail: aktomilin@gmail.com*² *АО «Русский алюминий менеджмент», Москва, 121096 Россия*³ *Компания «Макрогрупп», Санкт-Петербург, 196105 Россия**Статья поступила в редакцию 1.09.2025; после доработки 23.09.2025; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.13*

Представлены результаты экспериментов по прямому измерению электрического поля в отверстии тороида с переменным током частотой 50 Гц. В первом эксперименте использован экранированный зарядочувствительный датчик в виде металлического стержня. При этом обнаружено, что в случае традиционного одноточечного заземления экран не является эквипотенциальным и полностью блокирует работу датчика. Принудительная эквипотенциальность экрана выполнена с помощью двухточечного заземления, при этом датчик внутри экрана успешно регистрирует переменное электрическое поле. Результат эксперимента объясняется присутствием на оси тороида нестационарного безвихревого вектор-потенциала, который оказывает силовое воздействие на свободные электроны в металлическом зонде. Во втором эксперименте использован ползунковый реостат. Такая схема позволяет отказаться от заземленного экрана и эксперимент максимально упрощается. Выводы, полученные в результате экспериментов, дополняют представление о векторном потенциале и его свойствах и могут быть использованы при решении задач электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: обобщенная электродинамика, векторный потенциал, магнитное поле тороида, эффект Ааронова-Бома, электромагнитная совместимость.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-13-18

Введение

Тороидальные трансформаторы часто применяются в электротехнических и радиоэлектронных приборах. При этом возникает проблема электромагнитной совместимости приборов и аппаратуры, требующая детального исследования генерируемых электрических и магнитных полей.

В статье [1] описан эксперимент с тороидальным соленоидом (тороидом), по которому попускается ток частотой 50 Гц. Обмотка тороида заключена в сплошной заземленный экран. В результате электрометрическим ме-

тодом на оси внутреннего отверстия тороида (за пределами экранированной области) обнаружено и измерено потенциальное электрическое поле. Показано, что этот эффект не связан с электромагнитными полями рассеяния. Его происхождение объясняется полем нестационарного вектор-потенциала $\mathbf{A}(t)$. Обсуждается вопрос соответствия поля вектора \mathbf{A} теореме Гельмгольца о разложении на соленоидальную \mathbf{A}_s и потенциальную \mathbf{A}_p компоненты:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_s + \mathbf{A}_p. \quad (1)$$

Компонента A_p обычно исключается калибровками Кулона или Лоренца. Однако, как оказалось, она обладает определенным физическим содержанием и парадоксальными свойствами. Это совпадает с заключением, сделанным в статье [2]: «...векторный потенциал важнее электрических и магнитных полей. Поля векторного потенциала могут бесконтактным образом генерировать электрические поля через проводящие вещества». Аналогичный вывод сделан в статье [3]. Свойства поля вектора A_p исследованы также в работах, сведения о которых систематизированы в монографиях [4, 5].

Цель настоящего исследования заключается в прямом экспериментальном измерении двумя способами потенциального электрического поля в отверстии тороида с переменным током и вне его, а также в теоретическом объяснении результатов эксперимента.

Заметим, что способы измерения электрического поля в настоящей работе отличаются от способа, использованного в статье [1]. Сравнение результатов, полученных различными методами, позволяет сделать заключение об их достоверности.

Эксперимент по измерению потенциального электрического поля зарядочувствительным датчиком

На рис. 1 представлена схема эксперимента по измерению электрического поля во внутреннем отверстии тороидального соленоида, по которому пропускается переменный ток частотой 50 Гц. Основой соленоида служит полый цилиндр, представляющий собой наборный стальной сердечник с относительной магнитной проницаемостью 11000. Датчик квазистатического электрического поля представляет собой проводящий стальной стержень сопротивлением 0,1 Ом, соединённый с усилителем заряда. Сигнал такого датчика не зависит от емкости соединительных кабелей, а только от его собственной емкости и величины действующего на него поля.

Схема данного эксперимента принципиально отличается от описанного в [1]: здесь тороид не экранирован, а экранируется датчик. Экран изготовлен из поливинилхлорид-

ной трубки с внутренним диаметром 50 мм, на наружную поверхность которой нанесен электропроводный слой графитовым лаком толщиной 20 мкм. Между датчиком и экранирующей поверхностью имеется воздушная прослойка толщиной 20 мм. Если поле вектора A_p способно проникать через электропроводную поверхность, то результаты экспериментов с различными типами экранов не должны различаться.

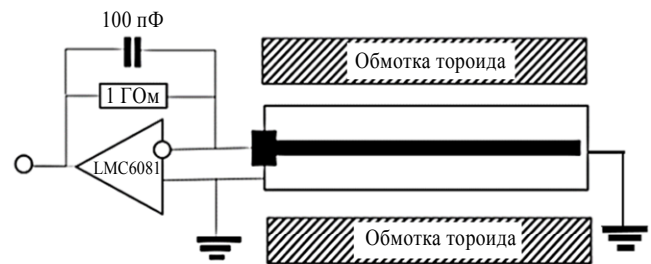


Рис. 1. Схема эксперимента с зарядочувствительным датчиком

Вначале был проведен эксперимент с заземлением экрана в одной точке. Он показал полное отсутствие сигнала датчика. При анализе причин такого результата были проведены замеры разности потенциалов между дистальным и проксимальным торцами электростатического экрана. Обнаружено, что она составляет 780 мВ. Следовательно, такой экран не является эквипотенциальным. Требуется «привести его к эквипотенциальности». Для этого необходимо заземлить экран с двух торцов, как показано на рис. 1. Однако при двух точках заземления неэквипотенциальной металлической оболочки в ней будут течь переменные токи. Чтобы они не создавали помех измерениям, необходимо их минимизировать. Для этого необходимо сделать экран достаточно высокоомным (например, десятки килоом), тогда протекающие в нем токи будут ничтожно малы, что позволит не учитывать их индукцию на датчик.

В использованной установке высота тороида составляла $h = 0,085$ м, действующее (измеренное) значение ЭДС на оси тороида $\bar{\varepsilon} = 780$ мВ, что соответствует ожидаемому действующему значению напряжённости электрического поля:

$$\bar{E} = \frac{\bar{\varepsilon}}{h} = 9,17 \text{ В/м.}$$

Произведена калибровка зонда вместе с усилителем заряда (УЗ) путем включения вольтметра в цепь заземления. Определен коэффициент передачи как отношение фактически измеренного напряжения на выходе УЗ к напряжению, поданному на торцы экрана: $K = 0,03$. При подаче на обмотку тороида напряжения 220 В с частотой 50 Гц датчик с эквипотенциальным экраном и УЗ регистрирует действующее напряжение $\bar{U} = \bar{\varepsilon} = 0,235$ В. С учётом коэффициента передачи это соответствует напряжённости электрического поля $\bar{E}_x = 9,17$ В/м. При изменении напряжения, подаваемого на тороид с помощью ЛАТР, была установлена линейная зависимость между входным напряжением и выходным сигналом.

Датчик, расположенный снаружи тороида, электрического поля не регистрирует, что согласуется с многочисленными измерениями с использованием замкнутых контуров, целиком расположенных вне отверстия.

Эксперимент с использованием ползункового реостата

Весьма желательно измерить электрическое поле максимально простыми техническими средствами, избегая различного рода помех и шумов. Для достижения этой цели был использован ползунковый реостат с сопротивлением 10 кОм и длиной, почти точно совпадающей с высотой тороида. В этом эксперименте использовался тот же тороид, что и в первом эксперименте. Точка контакта В с резистивным слоем изменяется по мере перемещения ползунка (рис. 2).

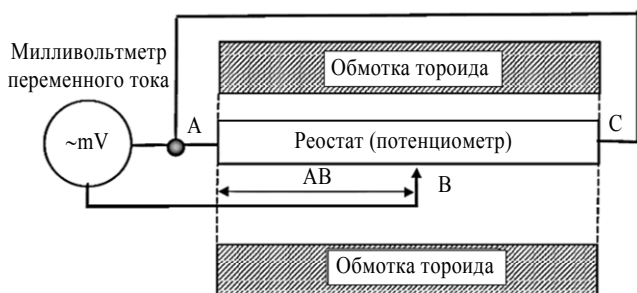


Рис. 2. Схема эксперимента с реостатом

Если обеспечить эквипотенциальность реостата путём замыкания его контактов А и С низкоомным проводником, то даже в условиях

действия индукции на резистивный слой реостата потенциал во всём слое от А до С будет одинаковым. Назовём такое техническое решение «эквипотенциальным реостатом». Ползунок В замкнут на точку А через милливольтметр переменного тока. Часть проводника, идущего от точки В к вольтметру, расположена внутри тороида. Она играет роль зарядочувствительного зонда, как и в первом эксперименте. В этой части проводника длиной $AB = x$ индуцируется ЭДС, которую тестирует прибор. По мере перемещения ползунка реостата изменяется x и, соответственно, изменяется измеряемое действующее напряжение (ЭДС индукции), возникающее на этом участке. В эксперименте использовался реостат с известной нелинейной характеристикой сопротивления $R(x)$. Напряженность электрического поля E на оси тороида, рассчитанная по формуле

$$E(x) = \frac{U(x)}{l_0} \frac{R_0}{R(x)}$$

оказалась практически постоянной и равной 13 В/м. Здесь l_0 и R_0 – соответственно, длина и максимальное сопротивление реостата, $U(x)$ – измеряемое напряжение. В результате получен линейный график зависимости ЭДС индукции от положения ползунка реостата (рис. 3).

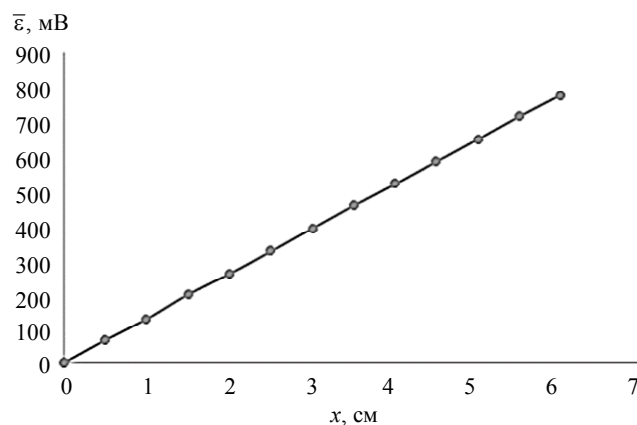


Рис. 3. Зависимость измеряемого ЭДС от длины участка $AB = x$

Таким образом, оба эксперимента фиксируют присутствие потенциального электрического поля на оси тороида, по обмотке которого течет переменный ток.

Теория

Прежде всего следует ответить на вопрос о происхождении потенциального электрического поля на оси тороида. Это явление невозможно объяснить полями рассеяния вокруг тороида: при частоте 50 Гц длина излучаемых электромагнитных волн более 6000 километров, следовательно, в пределах тороида не может возникнуть заметная разность потенциалов. Очевидно, что причина связана с нестационарным полем векторного потенциала, так как:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (3)$$

ЭДС индукции на оси x тороида «от торца до торца» определяется по формуле:

$$\varepsilon = \int_0^h E_x dx = -\int_0^h \frac{\partial A_x}{\partial t} dx = -\frac{\partial A_x}{\partial t} h. \quad (4)$$

Заметим, что здесь используется проекция A_x потенциального вектора \mathbf{A}_p на ось тороида и учтено, что нестационарное поле $E_x(t)$, как следует из экспериментов, является однородным. При этом свободные электроны с зарядом q движутся в металлическом зонде под действием силы:

$$F_x = qE_x.$$

Поскольку выходное напряжение УЗ пропорционально силе F_x , то эксперимент доказывает силовое действие нестационарного векторного потенциала \mathbf{A}_p на заряды. Этот вывод позволяет объяснить известный эффект Ааронова-Бома [6–11], но без квантовых представлений, которые часто для этого используются.

При синусоидальном законе переменного тока в тороиде с частотой f векторный потенциал изменяется по закону:

$$A_x = A_{x(\max)} \cos(2\pi ft). \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим

$$A_x = \frac{\varepsilon}{2\pi fh} \sin(2\pi ft),$$

затем можно вычислить амплитуду потенциальной компоненты вектора \mathbf{A} на оси тороида:

$$A_{x(\max)} = \frac{\bar{\varepsilon}}{\sqrt{2\pi fh}} = 0,0106 \text{ Тл} \cdot \text{м}.$$

Здесь учтено, что $\varepsilon = \bar{\varepsilon}\sqrt{2}$.

В монографии [4] изложена концепция обобщенной электродинамики, базирующаяся на представлении о четырехмерном векторе (кватернионе) магнитного поля (\mathbf{B}, B^*) . Такое представление соответствует теореме Гельмгольца о разложении поля на соленоидальную и потенциальную компоненты. Потенциальная компонента магнитного поля определяется скалярной функцией $B^*(x, y, z, t)$ и связана с вектор-потенциалом \mathbf{A} :

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = -B^*. \quad (6)$$

Понятно, что здесь $\mathbf{A} = \mathbf{A}_p$.

Скалярное магнитное поле (СМП) индуцирует, в частности, тороидальный соленоид (рис. 4). В идеальном случае вихревое (соленоидальное) и потенциальное (скалярное) магнитные поля тороида позиционно разделены: вихревое магнитное поле сосредоточено внутри его обмотки, а потенциальное – вдоль оси во внутреннем отверстии и изображено двумя областями с разными знаками. В области отрицательного СМП располагаются источники потенциального вектора \mathbf{A}_p , а в положительной – стоки.

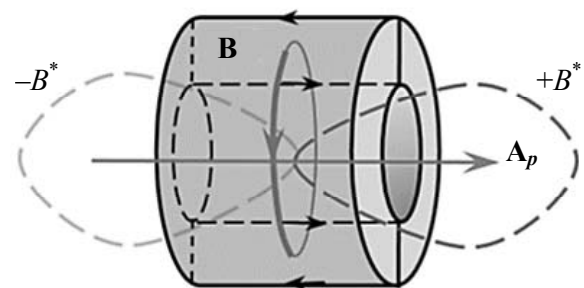


Рис. 4. Магнитное поле тороидального соленоида

В [3] приведена система дифференциальных уравнений обобщенной электродинамики (расширенные уравнения Максвелла). Одно из уравнений выражает закон безвихревой электромагнитной индукции:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial B^*}{\partial t}, \quad (7)$$

из которого следует, что нестационарное СМП с индукцией B^* генерирует потенциальное электрическое поле напряженностью \mathbf{E} . Заметим, что из уравнения (7) с учетом (6) вытекает формула (3). В этой же монографии приведены результаты нескольких экспериментов, подтверждающих явление безвихревой электромагнитной индукции. Эксперимент, описанный в настоящей статье, также подтверждает это явление.

Заключение

Сформулируем полученные результаты:

1. В первом эксперименте с помощью зарядочувствительного датчика зарегистрировано потенциальное электрическое поле в отверстии тороида с переменным током. Показано, что в подобных экспериментах необходимо добиваться эквипотенциальности электростатического экрана.

2. Подтвержден феномен проникновения поля безвихревого векторного потенциала сквозь эквипотенциальный электростатический экран, что важно учитывать в задачах электромагнитной совместимости.

3. Установлено, что в нестационарном поле безвихревого векторного потенциала заряженные частицы испытывают силовое воздействие. Этот результат следует иметь в виду при интерпретации эффекта Ааронова-Бома.

4. Во втором эксперименте реализована простейшая схема с потенциометром, не требующая заземления. Ее достоинство в доступности репликации эксперимента с целью проверки описанного феномена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томилин А. К., Мисюченко И., Викулин В. С. / Прикладная физика. 2024. № 5. С. 5–11. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-5-5-11>
2. Lekchaum S., Daibo M. / IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2020. Vol. 30. № 4. P. 1. <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2970918>
3. Апелъцин В. Ф., Полемаев А. И. / Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/955.html>
4. Томилин А. К. Обобщенная электродинамика. – М.: Триумф, 2020. <https://doi.org/10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04>
5. Zohuri B. Scalar Waves. In book: Scalar Wave Driven Energy Applications. – Springer, 2019. P. 443. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91023-9_6
6. Aharonov Y., Bohm D. / Physical Review. 1959. Vol. 115. P. 485–491.
7. Peshkin M., Tonomura A. The Aharonov-Bohm Effect. – Berlin; Heidelberg; New York; London; Tokio; Hong Kong; Springer-Verlag, 1989.
8. Tonomura A. The Quantum World Unveiled by Electron Waves, with a Preface of Chen Ning Yang – World Scientific, Singapore, 1998.
9. Лошак Ж. / Прикладная физика. 2003. № 2. С. 5–11.
10. Афанасьев Г. Н. / Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1990. Т. 21. Вып. 1. С. 172–250.
11. Зубков М. А., Поликанов М. И. / Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 23. № 57. С. 461.

PACS: 41.20.Gz

Detection of potential electric field induced by a toroid with low frequency current

A. K. Tomilin^{1*}, I. Misyuchenko², and V. S. Vikulin³

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia

² JSC "Russian Aluminum Management", Moscow, 121096 Russia

³ Macrogroupp company, St. Petersburg, 196105 Russia

*E-mail: aktomilin@gmail.com

Received 1.09.2025; revised 23.09.2025; accepted 27.04.2026

The article presents the results of experiments on direct measurement of the electric field in the toroid hole with alternating current of 50 Hz. In the first experiment, a shielded charge-sensitive sensor in the form of a metal rod was used. It was found that in the case of traditional single-point grounding, the screen is not equipotential and completely blocks the sensor opera-

tion. Forced equipotentiality of the screen is achieved using two-point grounding, and the sensor inside the screen successfully records the alternating electric field. The result of the experiment is explained by the presence of a non-stationary vortex-free vector potential on the toroid axis, which exerts a force effect on free electrons in the metal probe. In the second experiment, a slider rheostat was used. Such a scheme allows us to abandon the grounded screen and the experiment is simplified as much as possible. The conclusions obtained as a result of the experiments complement the idea of the vector potential and its properties and can be used in solving problems of electromagnetic compatibility.

Keywords: generalized electrodynamics, vector potential, magnetic field of a toroid, Aharonov-Bohm effect, electromagnetic compatibility.

REFERENCES

1. Tomilin A. K., Misyuchenko I., and Vikulin V. S., Applied Physics, № 5, 5–11 (2024) [in Russian]. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-5-5-11>
2. Lekchaum S. and Daibo M., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **30** (4), 1 (2020). <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2970918>
3. Apel'tsin V. F. and Poletaev A. I., Engineering Journal: Science and Innovations, № 9, (2013). URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technical/955.html>
4. Tomilin A. K. Generalized Electrodynamics. Moscow: Triumph, 2020 [in Russian]. <https://doi.org/10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04>
5. Zohuri B. Scalar Waves. In book: Scalar Wave Driven Energy Applications. Springer: 2019, pp. 443. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91023-9_6
6. Aharonov Y. and Bohm D., Physical Review **115**, 485–491 (1959).
7. Peshkin M. and Tonomura A. The Aharonov-Bohm Effekt. Berlin; Heideberg; New York; London; Tokyo; Hong Kong; Springer-Verlag, 1989.
8. Tonomura A. The Quantum World Unveiled by Electron Waves, with a Preface of Chen Ning Yang. World Scientific, Singapore, 1998.
9. Loshak Zh., Applied Physics, № 2, 5–11 (2003) [in Russian].
10. Afanasyev G. N., Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei **21** (1), 172–250 (1990) [in Russian].
11. Zubkov M. A. and Polikanov M. I., Letters to JETP **23** (57), 461 (1993) [in Russian].

Об авторах

Томилин Александр Константинович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40). E-mail: aktomilin@gmail.com SPIN-код: 6546-3766, AuthorID: 452939

Мисюченко Игорис, к.т.н., начальник инновационного отдела, АО «Русский алюминий менеджмент» (121096, Россия, Москва, ул. Василисы Кожинной, д. 1). E-mail: ruberoid2101@gmail.com

Викулин Владимир Станиславович, инженер, Компания «Макрогрупп» (196105, Россия, Санкт-Петербург, ул. Свеаборгская, д. 12А). E-mail: v_vikulin@mail.ru