

УДК 537.862
EDN: NIURAW

PACS: 41.20.Gz

Исследование квазистационарного электромагнитного поля на оси тороидального соленоида электрометрическим методом

А. К. Томилин, И. Мисюченко, В. С. Викулин

Произведен эксперимент по обнаружению электрического поля на оси внутреннего отверстия экранированного тороидального соленоида с переменным током частотой 50 Гц. Измеренная электрометрическим методом ЭДС составляет 250 мВ. Показано, что это не связано с магнитным полем рассеяния. Полученный результат объясняется присутствием на оси тороида нестационарного векторного потенциала. За счет этого возникает силовое воздействие на электроны в металлическом зонде. Обсуждаются возможные теоретические вопросы и технические задачи, связанные с использованием электрических систем тороидального типа.

Ключевые слова: векторный потенциал, эффект Ааронова-Бома, тороидальный трансформатор, электромагнитная совместимость, подводная радиосвязь.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-5-11

Введение

Катушки в виде тороидальных соленоидов используются в электротехнике и радиоэлектронике. При исследовании их электромагнитных полей обнаруживаются явления, которые иногда относят к числу парадоксальных [1–3]. В частности, отмечается, «что век-

торный потенциал важнее электрических и магнитных полей. Поля векторного потенциала могут бесконтактным образом генерировать электрические поля через проводящие вещества, что может быть применено к неразрушающему контролю и медицинскому оборудованию» [3].

Вектор-потенциал \mathbf{A} , введен Э. Ф. Нейманом в 1845 году как некая математическая абстракция. Первоначально он использовался только для выражения индукции магнитного поля:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} . \quad (1)$$

В последствие выяснилось, что напряженность нестационарного электрического поля так же связана с вектор-потенциалом:

$$\mathbf{E} = -\partial\mathbf{A}/\partial t . \quad (2)$$

После открытия эффекта Ааронова-Бома [4–9] стало понятно, что вектор \mathbf{A} является физически содержательным, поскольку при движении в его поле электроны испытывают некоторое воздействие. Лошак Ж. в статье [7]

Томилин Александр Константинович¹, проф., д.ф.-м.н.
E-mail: aktomilin@tpu.ru

Мисюченко Игорис², нач. инновационного отдела,
к.т.н.

E-mail: ruberoid2101@gmail.com

Викулин Владимир Станиславович³, инженер.

E-mail: v_vikulin@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² АО «Русский алюминий менеджмент».

Россия, 121096, Москва, ул. Василисы Кожиной, 1.

³ Компания «Макрогрупп».

Россия, 196105, Санкт-Петербург, ул. Свеаборгская, 12А.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024

После доработки 12.08.2024

Принята к публикации 20.08.2024

Шифр научной специальности: 1.3.2

© Томилин А. К., Мисюченко И., Викулин В. С., 2024

высказывает осторожное замечание: «...влияние бесполевого магнитного потенциала на электронные волны, является шокирующим для тех, кто был убежден в течение столетия, что электромагнитные потенциалы – только математические промежуточные объекты». Очевидно, современные научные представления о векторном потенциале находятся в стадии эволюции. В частности, поднимается вопрос [10, 11] о его соответствии теореме Гельмгольца, которая лежит в основе общей теории поля. Полное описание векторного поля согласно этой теореме должно включать две компоненты: соленоидальную и потенциальную.

Цель настоящего исследования заключается в экспериментальном определении электрометрическим методом характеристик квазистационарного электромагнитного поля на оси экранированного тороидального соленоида и в теоретическом описании результатов эксперимента с использованием векторного потенциала.

Эксперимент и обсуждение его результатов

В эксперименте использовался тороидальный соленоид (тороид) с полый пластмассовой основой в виде кругового цилиндра, заполненной ферромагнитным порошком с относительной магнитной проницаемостью примерно $\mu' = 10^4$. С учетом намотки внешний радиус составил $R_T = 45$ мм, внутренний радиус $r_T = 23$ мм, высота тороида $2h = 45$ мм. Намотка выполнена медным изолированным проводом диаметром 0,1 мм с числом витков $n = 500$ пар. Намотка имеет два слоя со взаимно противоположным направлением обхода по контуру. Это необходимо для компенсации так называемого «набегающего» витка, образующего круговой ток. Вихревые магнитные поля двух набегающих витков со взаимно

противоположным направлением тока компенсируют друг друга.

Обмотка тороида включена в электрическую сеть с напряжением 220 В, при этом переменный электрический ток имеет амплитуду $J_0 = 0,0125$ А и циклическую частоту $\omega = 314$ с⁻¹. Внутренняя и внешняя поверхность тороида экранированы алюминиевой фольгой толщиной 10^{-4} м через слой дополнительной изоляции. На внешней поверхности выполнен кольцевой разрез, чтобы избежать возникновения в экране индукционных токов. Дистальный (экранированной) от зонда торец тороида наглухо закрыт таким же экраном. Экран заземлен на реальную «землю», чтобы исключить индукционные наводки в проводниках измерительного контура и электродах зонда.

Прямое тестирование магнитного поля вокруг тороида, использованного в эксперименте, производилось магнитометром на базе датчика SS49E с чувствительностью 1,4 мВ/Гс. Получено значение индукции на уровне 10^{-5} Тл, что соответствует земному магнетизму. Проверено условие отсутствия сторонних электрических наводок в подводящих проводниках. Зонд длиной 50 мм введен по оси тороида без касания заземленного экрана. При отключенном питании тороида показания электрометра – 0 мВ. При подключении фазного провода к обмотке и отключенной нейтрали – 0 мВ. Следовательно, квазистатических наводок за счет электрического поля во внутреннем отверстии тороида нет.

В эксперименте использовалась установка, детальная схема которой представлена на рисунке 1. Во внутреннее отверстие тороида вводился зонд электрометра из посеребренной меди, длина которого l изменялась. Произведены электрометрические измерения действующего значения ЭДС между зондом и дистальным (заземленным) торцом тороида в зависимости от расстояния d между ними. При этом использовалась методика электрометрических измерений, описанная в [12].

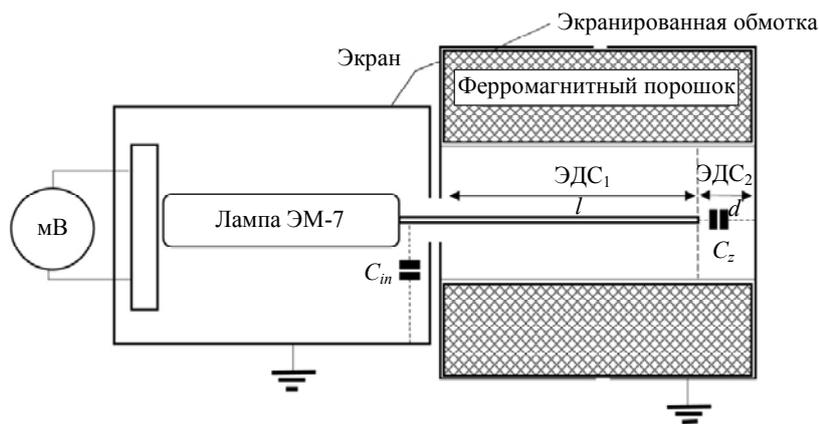


Рис. 1. Схема измерительной электростатической установки

Электрометр, имеет очень большое входное сопротивление (более 10 ГОм) и входную емкость $C_{in} = 4,57$ пФ. Зонд длиной l также имеет определенную электроемкость

$$C_z = 2\pi\epsilon_0 l / \ln(r/r_z),$$

где $r_z = 0,2$ мм – радиус проводника зонда и $r = 20$ мм – радиус внутреннего экрана, ϵ_0 – электрическая постоянная. При этом образуется емкостный делитель, имеющий два коэффициента. Коэффициент K_1 зависит от отношения входной емкости электрометра и емкости зонда. Он определяется при каждой конкретной длине зонда l и, соответственно, величине зазора d по формуле

$$K_1 = C_z / (C_z + C_{in}).$$

Кроме того, сам электрометр имеет неединичный коэффициент передачи

$$K_2 = U_e / U_{in} = 0,806,$$

измеренный путём сравнения поданного на вход электрометра эталонного напряжения

$U_{in} = 247$ мВ и измеренного выходного напряжения $U_e = 199$ мВ. Истинное действующее значение ЭДС определяется пересчетом показаний электрометра U_e по формуле:

$$\tilde{\epsilon} = U_e / (K_1 K_2). \tag{3}$$

Исходная гипотеза эксперимента состоит в том, что распределенная ЭДС возникает на всём участке цепи внутри отверстия тороида, т. е. полная ЭДС равна простой сумме ЭДС₁ (в зонде длиной l) и ЭДС₂ (в зазоре между зондом и дистальным торцом длиной d) (рис. 1). Эта суммарная ЭДС измеряется электростатическим методом и не зависит от длины зонда.

Для проверки данной гипотезы произведен ряд измерений ЭДС при различных длинах зонда l . Зонд последовательно укорачивался, начиная от максимальной длины 56 мм и до минимальной 20 мм. При каждой длине зонда измерялось действующее значение переменного напряжения и вычислялась истинное значение действующей ЭДС по формуле (3). Результаты эксперимента приведены в таблице.

Таблица

Результаты эксперимента

№	Длина зонда l , мм	Зазор d , мм	Измеренное напряжение, мВ	Емкость зонда, пФ	Коэффициент K_2	Истинная действующая ЭДС $\tilde{\epsilon}$, мВ
1	56	1	23	0,6761	0,253	221,03
2	50	7	22	0,6037	0,226	233,64
3	40	17	19,1	0,4829	0,181	247,53
4	30	27	15,4	0,3622	0,136	259,64
5	20	37	11,8	0,2418	0,090	291,11
Усредненное значение						250,59

С увеличением диэлектрического зазора d вычисленное значение ЭДС увеличивается, что объясняется увеличением внутреннего сопротивления распределенного источника.

Далее произведено дополнительное измерение при укороченном до торца тороида зонде: $l = 0$. Дистальный конец вывода триода оказывается при этом на расстоянии 5 мм от торца тороида. Измеренное на выходе электрометра действующее напряжение составило 8,1 мВ. Истинная ЭДС при этом имеет величину 132 мВ, то есть квазистатическое электрическое поле уменьшается с увеличением расстояния от левого торца тороида (рис. 1).

Таким образом, экспериментально обнаружен факт возникновения распределенной ЭДС на оси экранированного тороида, по которому пропускается нестационарный ток. Это подтверждает исходную гипотезу.

В работах [13, 14] исследованы вихревые магнитные поля рассеяния вокруг тороида. Они неизбежно возникают даже в случае катушки с компенсацией набегающего витка. Причина – не идеальность плотности распределения витков. Обсудим возможность объяснения результата выполненного эксперимента кондуктивными наводками за счет электромагнитных полей рассеяния. Магнитное поле рассеяния тороидальной катушки в ближней зоне практически совпадает с полем магнитного диполя [13]. Оно представляется в виде замкнутых силовых линий, расположенных в определенной диаметральной плоскости. Ориентация этой плоскости (угловое распределение) зависит от неоднородности катушки. В описанном выше эксперименте ЭДС индуцируется в незамкнутом проводнике, следовательно, его результат невозможно объяснить присутствием нестационарного магнитного поля на основе закона вихревой электромагнитной индукции М. Фарадея.

Нестационарное вихревое магнитное поле рассеяния индуцирует вихревое электрическое поле, вектор индукции которого расположен в плоскости ортогональной плоскости магнитного поля. В квазистационарном случае при частоте 50 Гц размер ближней волновой зоны в воздушной среде составляет примерно 6000 км, что значительно превышает размеры незамкнутого контура, использованного в эксперименте. Следовательно, такой неза-

мкнутый проводник не может использоваться в качестве антенны, тестирующей электромагнитное излучение тороида. Эти соображения соответствуют ГОСТ Р 51320–99, который применяется для измерения электромагнитных полей, излучаемых трансформаторами, с помощью антенн [15].

Таким образом, представления о рассеянных магнитных и электрических полях вокруг тороидального соленоида, основанные на известных теоретических представлениях, не позволяют объяснить результат описанного выше эксперимента.

Теория

В описанном эксперименте возникает ситуация, аналогичная эффекту Ааронова-Бома: во внутреннем отверстии тороида отсутствуют электромагнитные поля рассеяния, но присутствует нестационарное поле векторного потенциала, которое воздействует на свободные электроны в металлическом зонде. Нестационарный вектор-потенциал создает на оси тороида распределенный источник ЭДС, индукция которого с учетом (2) определяется по закону

$$\varepsilon(t) = - \int_{-h}^h \frac{\partial A(x,t)}{\partial t} dx. \quad (4)$$

Интегрирование здесь происходит вдоль линий вектора \mathbf{A} в пределах высоты тороида. Поле векторного потенциала тороидального соленоида изображено на рисунке 2.

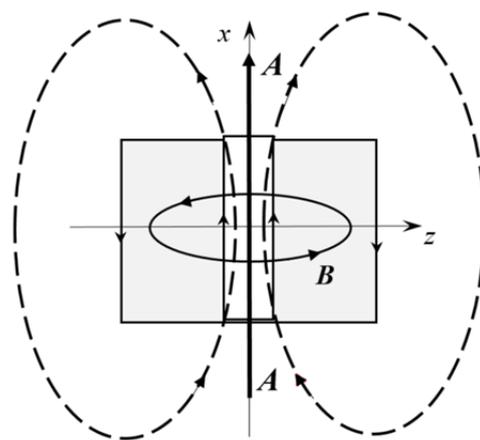


Рис. 2. Поле вектор-потенциала тороидального соленоида

Поскольку исследуемый электромагнитный процесс имеет нестационарный характер, представим функцию векторного потенциала в виде

$$A_x(t) = A_0 \cos \omega t. \quad (5)$$

Здесь принято допущение об однородном распределении вектор-потенциала вдоль оси x , поэтому амплитуда $A_0 = const$. С учетом (5) из закона (4) следует

$$\varepsilon(t) = 2A_0\omega h \sin \omega t. \quad (6)$$

Так как действующая ЭДС, полученная экспериментально, связана с амплитудным значением ε_a соотношением:

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_a / \sqrt{2},$$

то из (6) с учетом усредненного значения ЭДС $\tilde{\varepsilon}$, приведенного в Таблице, получим амплитуду вектор-потенциала

$$A_0 = \frac{\tilde{\varepsilon}}{\sqrt{2}\omega h} = 0,025 \text{ Тл} \cdot \text{м}. \quad (7)$$

Этот результат можно проверить, вычислив A_0 другим путем. Как известно, вихревое магнитное поле концентрируется внутри обмотки тороида. С использованием цилиндрических координат ρ , φ , x можно представить уравнение (1) в виде

$$B_\varphi(\rho, t) = -\frac{dA_x(\rho, t)}{d\rho}. \quad (8)$$

В формуле (8) учтена зависимость индукции азимутального магнитного поля от полярного радиуса ρ . Максимальное значение она имеет при $\rho = r_T$, а минимальное при $\rho = R_T$. В упрощенном расчете можно использовать усредненное значение

$$B_{\varphi(cp)}(\rho_{cp}, t) = B_0 \cos \omega t,$$

где $\rho_{cp} = r_T + \frac{R_T - r_T}{2}$ – средний радиус тороида.

Тогда из (8) в результате интегрирования получим

$$A_0 = -B_0(R_T - r_T) \cos \omega t. \quad (9)$$

Измеренное тесламетром действующее значение индукции вихревого магнитного поля внутри обмотки тороида изменяется с увеличением ρ в пределах $\tilde{B} = 1,24 \div 0,62$ Тл. Значение магнитной индукции на среднем радиусе тороида можно принять $\tilde{B} = 0,93$ Тл. Соответствующее амплитудное значение индукции $B_0 = \tilde{B}\sqrt{2} = 1,31$ Тл. Следовательно, в соответствии с (9), вектор-потенциал на оси тороида изменяется по гармоническому закону с амплитудой

$$A_0 = \tilde{B}\sqrt{2}(R_T - r_T) = 0,028 \text{ Тл} \cdot \text{м}. \quad (10)$$

Значения A_0 , вычисленные по формулам (7) и (10), практически совпадают с учетом погрешности измерений.

Таким образом, измерив экспериментально ЭДС $\tilde{\varepsilon}$, можно определить нестационарный векторный потенциал \mathbf{A} на оси тороида, который оказывает силовое воздействие на свободные электроны в зонде, что и регистрирует электрометр. Аналогичный вывод сделан в результате эксперимента Солунина А. М. и Костина А. В., описанном в монографии [10].

В порядке обсуждения полученного результата, заметим, что поле векторного потенциала на рисунке 2 изображено двумя типами линий: замкнутыми и одной незамкнутой, расположенной на оси тороида. Вопрос о разложении вектор-потенциала на соленоидальную и потенциальную компоненты считается дискуссионным. С исследованием потенциальной компоненты поля вектора \mathbf{A} связаны работы многих авторов, например, [16–23]. Как оказалось, безвихревая компонента вектор-потенциала обладает парадоксальными свойствами. В частности, обнаружена возможность при определенных условиях проникновения электромагнитных волн через электропроводные среды [3]. В монографии [11] описан эксперимент по передаче с помощью шаровых антенн электромагнитного сигнала из клетки Фарадея. В результате исследований в этом направлении найдено принципиальное решение проблемы высокочастотной подводной радиосвязи, которое успешно подтверждено результатами натуральных экспериментов в морской среде [24–26].

Заключение

Экспериментально обнаружено потенциальное электрическое поле за пределами заземленного экрана, охватывающего тороид с нестационарным током. Его происхождение связано с полем нестационарного вектор-потенциала. Это подтверждает теоретические представления о потенциальной компоненте векторного потенциала и соответствует теореме Гельмгольца. Обнаруженное явление необходимо учитывать при решении задач электромагнитной совместимости в электронной аппаратуре с учетом возможности проникновения этого поля через заземленный экран. Тороидальные антенны можно использовать для организации канала высокочастотной подводной радиосвязи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Leus V. A., Smith R. T., Maher S.* / Appl. Phys. Res. 2013. Vol. 5. № 4. P. 56–68. doi: [10.5539/apr.v5n4p56](https://doi.org/10.5539/apr.v5n4p56)
2. *Гусев А. В.* / P4-2013-116 ОИЯИ. Дубна. [http://www1.jinr.ru/Preprints/2013/116\(P4-2013-116\).pdf](http://www1.jinr.ru/Preprints/2013/116(P4-2013-116).pdf)
3. *Lekchaum S., Daibo M.* / IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2020. Vol. 30. № 4. P. 1–5. doi: [10.1109/TASC.2020.2970918](https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2970918)
4. *Aharonov Y., Bohm D.* / Physical Review. 1959. Vol. 115. P. 485–491.
5. *Peshkin M., Tonomura A.* The Aharonov-Bohm Effekt. – Berlin, Heidelberg, New York, London, Tokyo, Hong Kong. Springer-Verlag. 1989.
6. *Tonomura A.* The Quantum World Unveiled by Electron Waves, with a Preface of Chen Ning Yang – World Scientific, Singapore, 1998.
7. *Лошак Ж.* / Прикладная физика. 2003. № 2. С. 5–11.
8. *Афанасьев Г. Н.* / Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1990. Т. 21(1). С. 172–250.
9. *Аксенов В. В.* / Proc. Intern. Geom. Center. 2015. Vol. 8(3-4). P. 31–39. doi: [orcid.org/0000-0001-7525-0619](https://doi.org/10.0000-0001-7525-0619)
10. *Николаев Г. В.* Современная электродинамика и причины её парадоксальности. – Томск: Твердыня. 2003.
11. *Томилин А. К.* Обобщенная электродинамика. – М.: «Триумф», 2020. doi: [10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04](https://doi.org/10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04)
12. *Илюкович А. М.* Техника электротехники. – М.: Энергия. 1976.
13. *Бычков С. А., Шкоркин В. В.* / Доклады ТУСУРа. 2014. № 1 (31). С. 51–53.
14. *Бычков С. А., Шкоркин В. В.* / Доклады ТУСУРа. 2014. № 3 (33). С. 58–60.
15. ГОСТ Р 51320–99. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств – источников промышленных радиопомех. – М.: Госстандарт РФ, 2000.
16. *Ohmura T.* / Prog. Theor. Phys. 1956. Vol. 16 (6). P. 684–685.
17. *Хворостенко Н. П.* / Изв. ВУЗов. Физика. 1992. № 3. С. 24–29.
18. *Van Vlaenderen K. J., Waser A.* / Hadronic Journal. 2001. Vol. 24 (5). P. 609–628.
19. *Woodside D. A.* / Am. J. Phys. 2009. Vol. 77. P. 438–446. <https://doi.org/10.1119/1.3076300>
20. *Arbab A. I., Satti Z. A.* / Progress in physics. 2009. Vol. 2. P. 8–13.
21. *Hively L. M.* Systems, apparatuses, and methods for generating and/or utilizing scalar-longitudinal waves. Patent № 9, 306, 527 B1. (US). 2016.
22. *Keller O., Hively L. M.* / J. Phys. Commun. 2019. № 3. P. 115002. <https://doi.org/10.1088/2399-6528/ab5189>
23. *Zohuri B.* Scalar Waves. In book: Scalar Wave Driven Energy Applications. – Springer, 2019. P. 443–491. DOI:10.1007/978-3-319-91023-9_6
24. *Томилин А. К., Лукин А. Ф., Гульков А. Н.* / ПЖТФ. 2021. Т. 47 (11). С. 48–50. doi: [10.21883/PJTF.2021.11.51009.18710](https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.11.51009.18710)
25. *Лукин А. Ф., Томилин А. К., Гульков А. Н., Кремс К. А.* / ЖТФ. 2022. Т. 92 (9). С. 1425–1429. doi: [10.21883/JTF.2022.09.52935.43-22](https://doi.org/10.21883/JTF.2022.09.52935.43-22)
26. *Томилин А. К.* / ЖТФ. 2023. Т. 93 (3). С. 397–402. doi: [10.21883/JTF.2023.03.54852.255-22](https://doi.org/10.21883/JTF.2023.03.54852.255-22)

PACS: 41.20.Gz

Study of a quasi-stationary electromagnetic field on the axis of a toroidal solenoid using the electrometric method

A. K. Tomilin¹, I. Misyuchenko² and V. S. Vikulin³

¹ National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

² JSC “Russian Aluminum Management”
1 Vasilisa Kozhina st., Moscow, 121096, Russia

³ Macrogroup company
12 Sveaborgskaya st., St. Petersburg, 196105, Russia

Received 20.03.2024; revised 12.08.2024; accepted 20.08.2024

The electric potential on the axis of the internal hole of a shielded toroidal solenoid with alternating current with a frequency of 50 Hz was measured using the electrometric method. It is shown that the effect is not associated with the electromagnetic stray field. The electromotive force distributed along the toroid axis and the corresponding non-stationary vector potential are determined. On the axis of the toroid, conditions similar to the Aharonov-Bohm effect arise: there is no electromagnetic field, but there is a non-stationary vector potential, which exerts a force on the electrons in the metal probe. Possible theoretical issues and technical problems associated with the use of toroidal electrical systems are discussed.

Keywords: vector potential, Aharonov-Bohm effect, toroidal transformer, electromagnetic compatibility, underwater radio communications.

REFERENCES

1. Leus V. A., Smith R. T. and Maher S., Appl. Phys. Res. **5** (4), 56–68 (2013). doi: 10.5539/apr.v5n4p56
2. Gusev A. V., P4-2013-116 OIYAI. Dubna. [http://www1.jinr.ru/Preprints/2013/116\(P4-2013-116\).pdf](http://www1.jinr.ru/Preprints/2013/116(P4-2013-116).pdf) [in Russian].
3. Lekchaum S. and Daibo M., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **30** (4), 1–5 (2020). doi: 10.1109/TASC.2020.2970918
4. Aharonov Y. and Bohm D., Physical Review **115**, 485–491 (1959).
5. Peshkin M. and Tonomura A. The Aharonov-Bohm Effekt, Berlin, Heideberg, New York, London, Tokio, Hong Kong. Springer-Verlag. 1989.
6. Tonomura A. The Quantum World Unveiled by Electron Waves, with a Preface of Chen Ning Yang – World Scientific. Singapore, 1998.
7. Loshak Zh., Applied Physics, № 2, 5–11 (2003) [in Russian].
8. Afanas'yev G. N., Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra **21** (1), 172–250 (1990) [in Russian].
9. Aksenov V. V., Proc. Intern. Geom. Center **8** (3–4), 31–39 (2015). doi: orcid.org/0000-0001-7525-0619
10. Nikolaev G. V., Modern electrodynamics and the reasons for its paradoxical nature, Tomsk, Tverdunya, 2003 [in Russian].
11. Tomilin A. K., Generalized electrodynamics, Moscow, «Triumf», 2020. doi: 10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04 [in Russian].
12. Ilyukovich A. M., Tekhnika elektrometrii, Moscow, Energiya, 1976 [in Russian].
13. Bychkov S. A. and Shkorkin V. V., TUSUR reports, № 1 (31), 51–53 (2014) [in Russian].
14. Bychkov S. A. and Shkorkin V. V., TUSUR reports, № 3 (33), 58–60 (2014) [in Russian].
15. GOST R 51320–99. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Radiopomekhi industrial'nyye. Metody ispytaniy tekhnicheskikh sredstv – istochnikov industrial'nykh radiopomekh. Moscow, Gosstandart RF (2000) [in Russian].
16. Ohmura T., Prog. Theor. Phys. **16** (6), 684–685 (1956).
17. Khvorostenko N. P., Izv. Universities. Physics, № 3, 24–29 (1992) [in Russian].
18. van Vlaenderen K. J. and Waser A., Hadronic Journal **24** (5), 609–628 (2001).
19. Woodside D. A., Am. J. Phys. **77**, 438–446 (2009). <https://doi.org/10.1119/1.3076300>
20. Arbab A. I. and Satti Z. A., Progress in physics **2**, 8–13 (2009).
21. Hively L. M. Systems, apparatuses, and methods for generating and/or utilizing scalar-longitudinal waves. Patent № 9, 306, 527 B1. (US). 2016.
22. Keller O. and Hively L. M., J. Phys. Commun., № 3, 115002 (2019). <https://doi.org/10.1088/2399-6528/ab5189>
23. Zohuri B., Scalar Waves. In book: Scalar Wave Driven Energy Applications. Springer. 2019, pp. 443–491. doi: 10.1007/978-3-319-91023-9_6
24. Tomilin A. K., Lukin A. F. and Gulkov A. N., Technical Physics Letters **47** (6), 577–579 (2021). doi: <https://doi.org/10.1134/S1063785021060146>
25. Lukin A. F., Tomilin A. K., Gulkov A. N. and Krems K. A., Technical Physics **69** (4), 945–949 (2024).
26. Tomilin A. K., Technical Physics **68** (3), 370–375 (2023). doi: 10.21883/TP.2023.03.55812.255-22