

## СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ "ЭЛЕКТРОТОНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ" ФАРАДЕЯ

Боев В.М., д.т.н., проф.,  
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Теоретические основы электротехники",  
тел. (057) 707-69-61

Рогачев С.И., к.т.н., доц.  
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические машины".  
тел. (057) 707-68-44

*Приведений аналіз процесу проникнення магнітного поля в надпровідники першого і другого роду, заснований на використанні фарадєївської концепції "електротонічного стану" (векторного потенціалу).*

*Приведен анализ процесса проникновения магнитного поля в сверхпроводники первого и второго рода, основанный на использовании фарадеевской концепции "электротонического состояния" (векторного потенциала).*

*Статья посвящена 175-летию первой серии "Экспериментальных исследований по электричеству" М. Фарадея.*

В работах [1, 2] предпринята попытка объяснения процесса электромагнитной индукции на уровне умозрительного анализа известных законов и экспериментальных фактов (которым главным образом и пользовался М. Фарадей в процессе своих экспериментальных исследований), основанная на использовании концепции "электротонического состояния", как суммы вихрей векторного потенциала, являющихся неотъемлемой частью всякого магнитного потока ( $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$ ).

Мы придаем большое значение такого рода анализу и наглядным представлениям физических процессов исходя из задач и целей преподавания теоретической электротехники и образовательного процесса в целом. В предисловии к "Трактату об электричестве и магнетизме" [3] Дж. К. Максвелл пишет, имея в виду преимущества способа мышления и выражений Фарадея в "Экспериментальных исследованиях по электричеству" [4]: "Для изучающего любой предмет чтение оригинальных трудов представляет собой большое преимущество, так как всегда наука наиболее полно усваивается при своем появлении на свет...". О самой концепции "электротонического состояния" и оценке ее Максвеллом в примечаниях редактора к "Избранным сочинениям" [3] читаем следующее: "Максвелл придавал идее Фарадея об "электротоническом состоянии" важнейшее значение. Он связывал его с представлением о магнитном потоке и его инерционных свойствах... Он вводит функцию вектор-потенциала, которая должна служить векторной характеристикой электротонического состояния".

Сам Максвелл в статье "О Фарадеевских силовых линиях" [3] пишет, имея ввиду идею "электрото-

нического состояния": "Только благодаря физической важности я изложил здесь математическое выражение одной из идей Фарадея...". И далее в "Трактате" [3]: "В результате целого ряда опытов, которые были основаны на тщательном размышлении, но без помощи математических вычислений, он пришел к идее, что существует нечто, что нам ныне известно как математическая величина и, что может быть даже названо основной величиной в теории электромагнетизма". То есть Максвелл рассматривает векторный потенциал (электротоническое состояние) как основную величину, характеризующую электромагнитное поле, что соответствует фундаментальности потенциалов в квантовой электродинамике, о которой говорит Р. Фейнман [5]: "В квантовой электродинамике в системе уравнений, заменяющих собой уравнения Максвелла, векторный и скалярный потенциалы уже считаются фундаментальными величинами. Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  постепенно исчезают из современной записи физических законов: их вытесняют  $\vec{A}$  и  $\phi$ ".

В данной статье исследуется возможность описания с помощью концепции "электротонического состояния" явления сверхпроводимости, как крайнего проявления свойств электротехнических материалов, на уровне умозрительного восприятия экспериментальных фактов и результатов теоретических исследований этого явления.

Миткевич В.Ф. в работе [6] приводит мысленный эксперимент со сверхпроводящим тонкостенным тороидом, находящимся в магнитном поле соосного с ним прямолинейного проводника с током  $i_0$  (рис. 1,а), и приходит к выводу, что в этом случае неприменима ни одна из трех формулировок закона электромагнитной индукции (Фарадея, Максвелла, Миткевича) [2, 6], а объяснение смысла происходящих явлений может быть дано исходя из идеи Фарадея об электротоническом состоянии.

Ток в проводнике  $i_0$  создает магнитное поле  $\Phi$  во всем пространстве, причем внутри и вне полости проводника тороида силовые линии поля  $\vec{B}$  будут касательными к поверхности. Если перевести материал проводника тороида в сверхпроводящее состояние, а затем выключить ток  $i_0$ , то на внутренней поверхности попе-

речного сечения тороида возникает ток  $i_1$ , поддерживающий неизменным магнитный поток внутри полости сечения тороида (в соответствии со свойствами сверхпроводящего состояния и правилом Ленца), тогда как внешний поток исчезнет (рис. 1,б, случай I, согласно терминологии [6]).

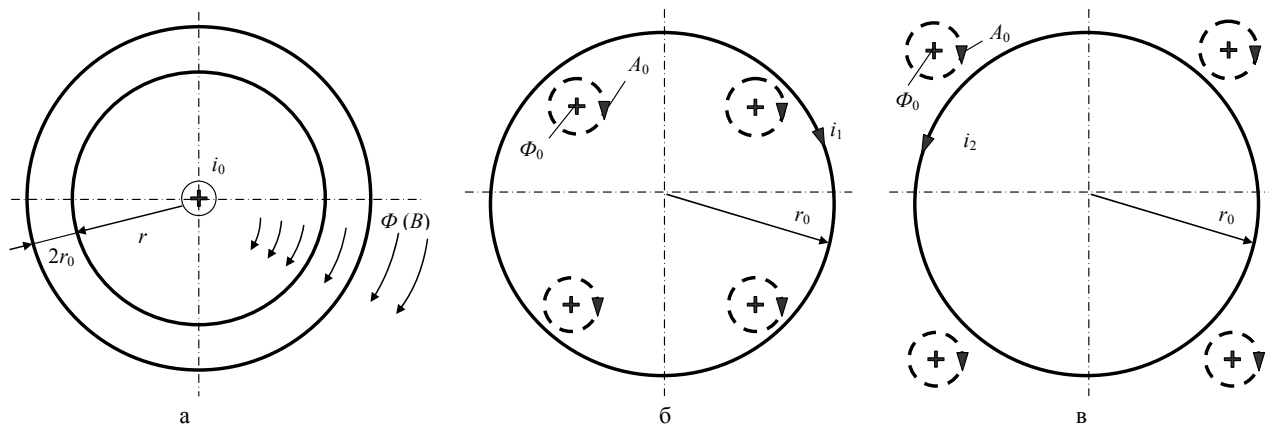


Рис. 1

Если поменять порядок действий, то есть сначала перевести тороид в сверхпроводящее состояние, а затем включить ток  $i_0$ , то магнитное поле будет только вне сечения тороида. При этом на внешней поверхности поперечного сечения тороида возникнет ток  $i_2$ , направленный противоположно току  $i_1$  предыдущего опыта (случай II, рис. 1,в). Если после достижения случая I вновь включить ток в проводнике  $i_0$ , то на внешней поверхности появится ток  $i_2$ , накладываясь на противоположный и равный ему ток  $i_1$ . В результате получается наложение случаев I и II и положение, которое существовало в случае I до отключения тока  $i_0$ , то есть ток  $i_0$  включен и магнитное поле занимает все пространство, и внутри полости, и вне сечения тороида (случай III). Миткевич В.Ф. делает следующие выводы: "Все происходит так, как будто вся поверхность сверхпроводника, расположенного в магнитном поле, которое заполняет пространство и снаружи и внутри данного сверхпроводника (случай III), уже находится в каком-то особом состоянии, могущем обнаруживаться либо одной, либо другой стороной ... Подобная зависимость мыслима только в предположении, что упомянутые две возможности уже, так сказать, заложены в основе процесса, который вообще происходит в магнитном поле самом по себе, вне всякой связи с наличием какого-либо постороннего тела ... Все это в высокой степени соответствует общему характеру идеи Фарадея об особом электротоническом состоянии ... Фарадей мыслил электротоническое состояние как свойство, присущее самому магнитному потоку. Максвелловское представление о магнитных вихрях позволяет высказать некоторые соображения в развитие идеи об электротоническом состоянии ... На поверхности эквивалентного проводника в большей или меньшей степени происходит увлечение элементарных электрических заря-

дов со стороны магнитных вихрей ... Необходимо прийти к заключению, что каждый элементарный магнитный вихрь (магнитная линия) и каждая совокупность подобных вихрей, то есть любая трубка магнитной индукции вообще, по своей природе включают в себя процесс, которому мы должны приписать электрический характер ("эквивалент току электричества" – по Фарадею – **авторы**) ... Совокупность же этих магнитных вихрей, будучи распределенной по всему пространству, занятому магнитным полем, представляет собой основной источник тех свойств, которыми обладает данное поле".

На рис. 1,б,в магнитные вихри (вихри векторного потенциала), охватывающие каждую трубку магнитного потока  $\Phi_0$  (полагаем квант магнитного потока), показаны пунктирной линией. Если рассматривать вихри векторного потенциала как действующее (на заряды) начало [2], что согласуется с выводами Миткевича В.Ф., то возникновение токов  $i_1$  и  $i_2$  в тонкой сверхпроводящей стенке сечения тороида (рис. 1,б,в) объясняется именно действием этих вихрей.

В реальных экспериментах со сверхпроводящими материалами подобные вихри наблюдаются [7-10], что подтверждает состоятельность вышеизложенной идеи. В сверхпроводниках первого рода (все чистые металлы – сверхпроводники, кроме ниобия) при внешнем магнитном поле, близком к критическому  $H_c$  (минимальное значение внешнего поля, при котором сверхпроводимость разрушается) может возникать так называемое "промежуточное состояние". Теория промежуточного состояния была разработана Ландау Л.Д. в 1937 г. [8]. Разрушение сверхпроводящего состояния длинного цилиндра из сверхпроводника первого рода в однородном магнитном поле, параллельном оси цилиндра, происходит при достижении полем критического значения  $H_c$ . Если же форма сверхпро-

водника имеет более сложную конфигурацию (например, эллипсоид, шар и т.д.), то на поверхности сверхпроводника распределение поля будет неравномерным. Поскольку магнитное поле не проникает в сверхпроводник первого рода (эффект Мейснера), то в экваториальной плоскости шара или эллипсоида магнитное поле у поверхности может превышать критическое поле, когда внешнее поле еще меньше критического  $H < H_c$  (вследствие сгущения обтекающих шар силовых линий в экваториальной плоскости). В этом случае сверхпроводящий шар переходит в промежуточное состояние, то есть разобьется на сеть чередующихся областей сверхпроводящей и нормальной фазы. При этом границы поверхности этих областей будут всегда параллельны магнитному полю, хотя в сечении, перпендикулярном полю, они могут образовывать фигуры весьма причудливой формы [8].

В сверхпроводниках второго рода (ниобий и сверхпроводящие сплавы с короткой длиной свободного пробега электронов) в области магнитных полей между первым и вторым критическим полем  $H_{c1} < H < H_{c2}$  наблюдается "смешанное состояние", характеризующееся проникновением в сверхпроводник квантов магнитного потока  $\Phi_0$ , окруженных вихрями сверхпроводящего тока. Сердцевина таких вихревых образований находится в нормальном состоянии, причем вихри образуют симметричную решетку, треугольную или квадратную [7-10].

На рис. 2 представлен фрагмент сечения сверхпроводника второго рода в смешанном состоянии, где  $\Phi_0$  – кванты магнитного потока,  $A_0$  – вихри векторного потенциала,  $i$  – сверхпроводящий ток (охватывающий как весь сверхпроводник – мейснеровский поверхностный ток, так и каждый островок нормального состояния, несущий квант потока  $\Phi_0$ ). Сверхпроводящее состояние на рисунке показано заштрихованным. Процесс может осмысливаться следующим образом. В магнитном поле  $H < H_{c1}$ , меньшем первого критического поля, реализуется эффект Мейснера и в тело сверхпроводника не проникает магнитное поле, вытесняемое поверхностным (мейснеровским) током, который может трактоваться как вызванный действием вихрей векторного потенциала  $A_0$ , находящихся у поверхности квантов магнитного потока  $\Phi_0$  (рис. 2).

При увеличении магнитного поля вихри  $A_0$  проникающих в сверхпроводник квантов потока  $\Phi_0$  искажают поверхностный ток  $i$ , который перемыкаясь образует кольцевой сверхпроводящий ток вокруг квантов магнитного потока  $\Phi_0$ .

На рис. 2 показаны три таких вихря в момент, предшествующий замыканию и отделению кольцевых токов вокруг квантов потока  $\Phi_0$  ("отпочкованию" – по терминологии Миткевича В.Ф.).

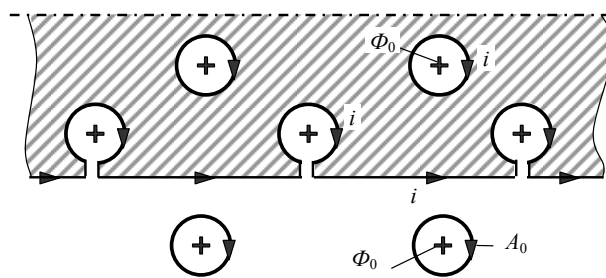


Рис. 2.

При дальнейшем увеличении поля кванты потока проникают в тело сверхпроводника в сопровождении вихрей сверхпроводящего тока  $i$  и образуют симметричную решетку (вследствие отталкивающего взаимодействия), которая будет тем гуще, чем больше величина магнитного поля. При достижении второго критического поля  $H_{c2}$  сверхпроводимость разрушается. В промежуточном состоянии сверхпроводников первого рода процесс может трактоваться аналогично, с той только разницей, что магнитное поле проникает в сверхпроводник не отдельными квантами  $\Phi_0$ , а большими группами, образующими макроскопические островки – области нормального состояния, которые будут расти с увеличением магнитного поля до полного разрушения сверхпроводимости (перехода в нормальное состояние).

Автор теории вихревой решетки смешанного состояния сверхпроводников второго рода Абрикосов А.А. в статье [10] приводит качественную картину изменения в зависимости от расстояния магнитного поля  $H$  и параметра порядка  $\Psi$  (теории Гинзбурга-Ландау) отдельного вихря решетки (рис. 3,а). Параметр порядка теории Гинзбурга-Ландау  $\Psi$  – это волновая функция сверхпроводящих электронов (куперовских пар), характеризующая их плотность [9, 10]. Это – макроскопическая волновая функция [11].

С другой стороны, волновая функция свободного электромагнитного поля – это векторный потенциал [5]. Полагая, как и ранее, что вихри векторного потенциала могут действовать на заряды, и учитывая, что сверхпроводящие электроны в вихрях тока  $i$  вокруг каждого кванта потока  $\Phi_0$  (рис. 2) движутся без диссипации энергии (сверхпроводимость это сверхтекучесть "заряженной жидкости" [12]), вполне вероятно предположить определенную пропорциональную связь между параметром порядка  $\Psi(r)$  (рис. 3,а) и векторным потенциалом  $A(r)$  (рис. 3,б). Для упрощения мы использовали кусочно-линейную аппроксимацию зависимости  $A(r)$ , которую можно записать с помощью разрывных функций [13] в следующем виде:

$$A(r) = A_\varphi(r) = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{|r-r_0|}{r-r_0} \right) \frac{r}{r_0} A_0 + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{|r-r_0|}{r-r_0} \right) A_0,$$

где  $r_0$  – радиус вихря векторного потенциала  $A_0$ .

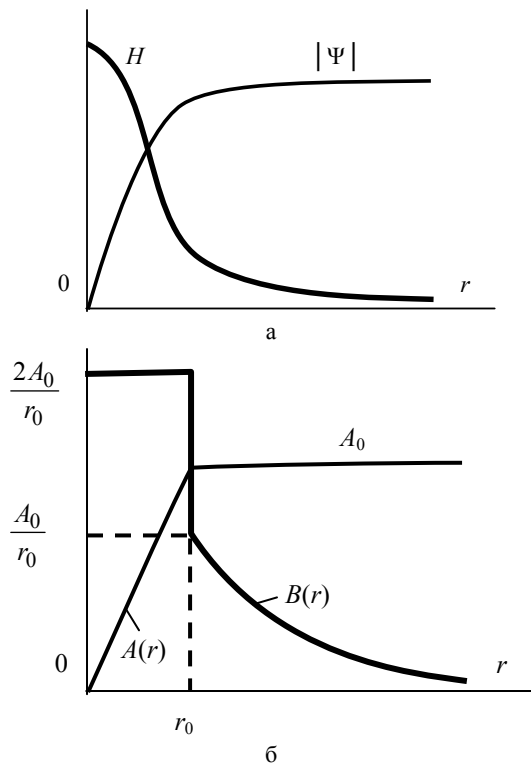


Рис. 3.

Тогда индукция магнитного поля ( $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$ ):

$$B(r) = B_z(r) = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (r \cdot A_\varphi) =$$

$$= \left(1 - \frac{|r - r_0|}{r - r_0}\right) \frac{A_0}{r_0} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{|r - r_0|}{r - r_0}\right) \frac{A_0}{r}.$$

На рис. 3,б показана зависимость  $B(r)$ , соответствующая этой формуле. В рамках наших приближений сходство кривых рис. 3,а,б удовлетворительное, что оправдывает сделанные выше предположения.

Таким образом, трактуя "электротоническое состояние" как совокупность вихрей векторного потенциала  $A_0$ , связанных с каждым квантом магнитного потока  $\Phi_0$ , способную действовать на электрические заряды ("эквивалент току электричества" – по Фарадею), возможно объяснить и явления, наблюдаемые в сверхпроводнике, находящемся в магнитном поле. Мы полагаем, что плодотворность Фарадеевской идеи об "электротоническом состоянии" этим не исчерпывается.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Боев В.М., Грибская Е.А., Лавриненко О.В. "Электротоническое состояние" и закон электромагнитной индукции Фарадея // Электротехника и электромеханика. – НТУ "ХПИ". – Харьков: 2004. – № 4. – С. 5-8.
- [2] Боев В.М. ЭДС само и взаимной индукции с точки зрения концепции "электротонического состояния" Фарадея // Электротехника и электромеханика. – НТУ "ХПИ". – Харьков: 2005. – № 2. – С. 5-7.
- [3] Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: Госиздат, 1954. – 687 с.
- [4] Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. – М.: Изд. АН СССР. – Т. 1, 1947. – Т. 2, 1951. – Т. 3, 1954.
- [5] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 6 – Электродинамика. – М.: Мир, 1966. – 344 с.
- [6] Миткевич В.Ф. Магнитный поток и его преобразования. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1946. – 356 с.
- [7] Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. – М.: Наука, 1982. – 240 с.
- [8] Кресин В.З. Сверхпроводимость и сверхтекучесть. – М.: Наука, 1978. – 190 с.
- [9] Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 704 с.
- [10] Абрикосов А.А. Сверхпроводники второго рода и вихревая решетка // УФН, 2004. – Т. 174. – № 11. – С. 1234-1239.
- [11] Легgett Э. Дж. Сверхтекучий  $^3\text{He}$ : ранняя история глазами теоретика // УФН, 2004. – Т. 174. – № 11. – С. 1256-1268.
- [12] Гинзбург В.Л. О сверхпроводимости и сверхтекучести // УФН, 2004. – Т. 174. – № 11. – С. 1240-1255.
- [13] Боев В.М. Использование разрывных функций для расчета переходных процессов и импульсных воздействий в линейных электрических цепях. I. Переходные процессы // Электронное моделирование. – Киев: 2002. – Т. 24. – № 6. – С. 67-79.

Поступила 18.05.2006