

И.Н.Фетисов

ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Методические указания к выполнению лабораторной работы Э -66
по курсу общей физики

Москва 2010

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное поле – особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами. Электромагнитное поле имеет две переменные составляющие – электрическое и магнитное поля, взаимно превращающиеся друг в друга. Полное описание электрических и магнитных полей в их взаимосвязи дают уравнения Максвелла [1-3].

Электрическое и магнитное поля существуют раздельно только в виде постоянных полей. Источником постоянного электрического поля, называемого *электростатическим*, или *потенциальным полем* служат неподвижные электрические заряды. Кроме потенциального поля, существует *вихревое электрическое поле*, возникающее в переменном магнитном поле. Два вида электрических полей имеют существенные различия.

Цель работы – ознакомление с вихревым и потенциальным электрическим полем; в практической части – наблюдение газового разряда в вихревом и потенциальном электрических полях; выполнение расчетных заданий для вихревого поля.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Потенциальное электрическое поле

Основной характеристикой электрического поля, как потенциального, так и вихревого, служит векторная величина **E** - *напряженность поля*. Если на помещенный в поле точечный положительный («пробный») заряд *q* действует сила **F** (рис. 1), то поле в данной точке имеет напряженность

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1)$$

Модуль вектора **E**, Н/Кл, численно равен силе, действующей на единичный заряд. *Примечание:* векторы набраны жирным шрифтом.

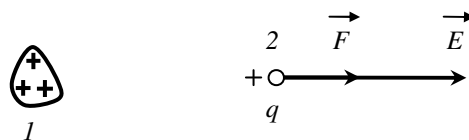


Рис. 1. К определению напряженности электрического поля: 1 – заряды - источник поля; 2 – «пробный» заряд.

Основным законом электростатики является *закон Кулона*: два неподвижных точечных заряда взаимодействуют в вакууме с силами, пропорциональными произведению модулей зарядов и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними (рис. 2)

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (2)$$

где $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м (фарад на метр) – электрическая постоянная.

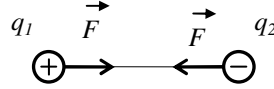


Рис. 2. Закон Кулона

Силы, зависящие только от расстояния между взаимодействующими частицами и направленные по прямой, проходящей через эти частицы, называют *центральными*. Кулоновские силы, а также гравитационные и упругие, являются центральными силами.

Если источником поля служит точечный заряд q , то напряженность поля в вакууме на расстоянии r от него равна

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (3)$$

Легко видеть, что (3) следует из (1) и (2).

Если поле создается несколькими зарядами (рис. 3) и каждый из них в отдельности в некоторой точке пространства создает поле напряженности $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$, то суммарное поле имеет напряженность, определяемую геометрической суммой векторов (*принцип суперпозиции* электрических полей):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (4)$$

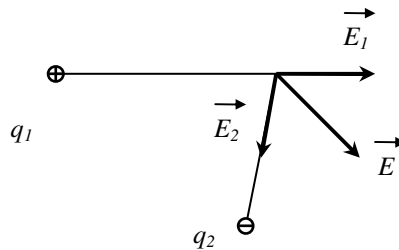


Рис. 3. Принцип суперпозиции электрических полей.

Принцип суперпозиции справедлив и для вихревого электрического поля.

Электрическое поле можно представить наглядно с помощью *линий напряженности*, или линий вектора \vec{E} (рис. 4). Эти линии проводят так, чтобы касательная к ним в каждой точке совпала с направлением вектора \vec{E} , а густота линий, т. е. число линий, пронизывающих единичную площадку, перпендикулярную линиям в данной точке, была бы пропорциональна модулю вектора \vec{E} . Кроме того, этим линиям приписывают направление, совпадающее с направлением вектора \vec{E} .

Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных и кончаются на отрицательных зарядах; эти линии *не замкнутые*.

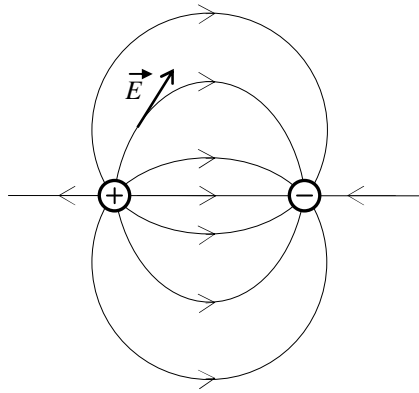


Рис. 4. Линии напряженности

При описании векторных полей (электрического, магнитного и др.) используют характеристику поля – поток. *Поток вектора \mathbf{E}* через элементарную площадку dS определяется как (рис. 5)

$$d\Phi = E_n dS, \quad (5)$$

где $E_n = E \cos\alpha$ – проекция вектора \mathbf{E} на направление нормали к площадке. В общем случае неоднородного поля и произвольной поверхности S поток равен интегралу по поверхности

$$\Phi = \int_S E_n dS.$$

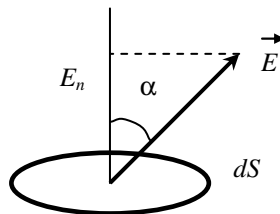


Рис. 5. К определению потока векторной величины

Поток вектора \mathbf{E} сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охватываемых этой поверхностью, деленной на ϵ_0

$$\oint_S E_n dS = \frac{q_{\text{ВНУТР}}}{\epsilon_0}.$$

Эта формула выражает в интегральной форме *теорему Гаусса* для вектора \mathbf{E} в вакууме. Теорема Гаусса отражает в обобщенной форме свойства электростатического поля: поле создается зарядами, между которыми действуют центральные силы; поле подчиняется принципу суперпозиции; напряженность поля точечного заряда убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Если точечный заряд q перемещается в электрическом поле, то действующая на него сила $\mathbf{F} = q \mathbf{E}$ совершает работу. Элементарная работа силы на перемещении $d\mathbf{l}$ равна скалярному произведению векторов \mathbf{F} и $d\mathbf{l}$ (рис. 6)

$$dA = (\vec{F}, d\vec{l}) = (q\vec{E}, d\vec{l}) = qE_l dl,$$

где $E_l = E \cos \alpha$ - проекция вектора \mathbf{E} на направление вектора перемещения $d\mathbf{l}$.

Работа сил поля на пути от точки 1 до точки 2 определяется как

$$A = q \int_1^2 E_l dl \quad (6)$$

Этот интеграл берется по некоторой линии (пути), поэтому его называют *линейным*. Если заряд перемещается по той же траектории в обратном направлении, то знак работы изменяется на противоположный, а модуль работы не изменяется.

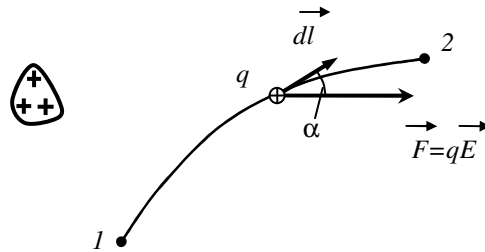


Рис. 6. Работа по перемещению заряда в электрическом поле

Электростатическое поле имеет важное свойство - работа (6) в нем *не зависит от формы пути* (рис. 7): работа на траектории 1a2 равна работе на траектории 1b2. Этим свойством обладают все центральные силы – кулоновские, гравитационные и упругие. Отсюда следует, что *работа консервативных сил на замкнутом пути равна нулю*. Это свойство поля отражает интеграл по замкнутой линии, называемый *циркуляцией* вектора \mathbf{E}

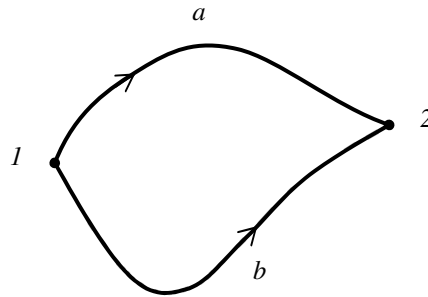


Рис. 7. Работа по перемещению заряда по замкнутой линии

$$\oint E_l dl = 0 \quad (7)$$

Поле, обладающее свойством (7), называют *потенциальным*. Значит, любое электростатическое поле, а также поле гравитационных и упругих сил, является потенциальным.

2. Магнитное поле

Рассмотрим свойства магнитного поля, так как именно в нем возникает вихревое электрическое поле. Магнитное поле - силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды, а также на тела, обладающие магнитным моментом. Источниками магнитного поля являются намаг-

ниченые тела, проводники с током и движущиеся электрически заряженные частицы. Природа этих источников едина - магнитное поле возникает в результате движения заряженных микрочастиц (электронов, протонов, ионов), а также благодаря наличию у элементарных частиц собственного (т. н. *спинового*) магнитного момента. Переменное магнитное поле возникает также при изменении во времени электрического поля.

На точечный электрический заряд q , движущийся со скоростью \mathbf{v} в магнитном поле, действует *магнитная сила (сила Лоренца)*

$$\mathbf{F}_M = q [\mathbf{v} \mathbf{B}], \quad (8)$$

где $[\mathbf{v} \mathbf{B}]$ – векторное произведение. Формула (8) служит определением *магнитной индукции* \mathbf{B} , которая является основной, силовой характеристикой поля.

Вектор \mathbf{F}_M перпендикулярен плоскости, образованной векторами \mathbf{v} и \mathbf{B} , а направление силы для положительного заряда задается правилом правого винта или левой руки (рис.8); для отрицательного заряда направление силы - противоположное. Модуль магнитной силы равен

$$F_M = q v B \sin \alpha,$$

где α - угол между векторами \mathbf{v} и \mathbf{B} .

Единица магнитной индукции - *тесла* (Тл). В поле с индукцией 1 Тл на частицу с зарядом 1 Кл и скоростью 1 м/с действует максимальная (при $\sin \alpha = 1$) сила 1 Н.

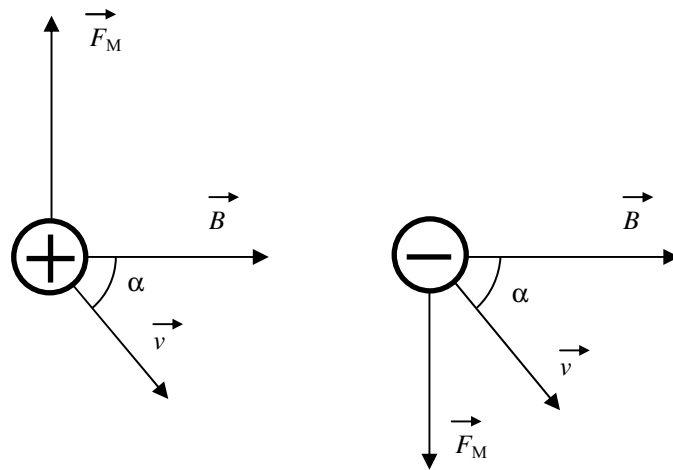


Рис. 8. Направление силы при движении заряда в магнитном поле.

Магнитное поле в вакууме, создаваемое токами в проводах, пропорционально силе тока I . Например, внутри длинного соленоида (катушки) магнитное поле однородное и равно

$$B = \mu_0 I n. \quad (9)$$

Здесь μ_0 - *магнитная постоянная*, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (генри на метр); n – число витков на единицу длины соленоида.

Магнитные поля изображают графически линиями магнитной индукции, касательные к которым указывают направление вектора \mathbf{B} в данной точке поля. Линии магнитной индукции - *непрерывные, замкнутые* (рис. 9). Векторные поля, обладающие замкнутыми линиями, называются *вихревыми* полями. Магнитное поле есть вихревое поле. В этом заключается существенное отличие магнитного поля от электростатического, в котором линии напряженности – не замкнуты.

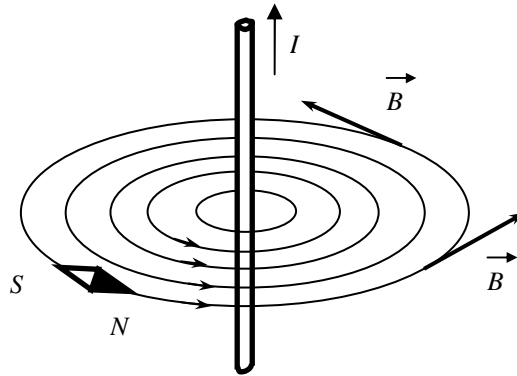


Рис. 9. Линии магнитной индукции прямого тока.

Определение потока вектора \mathbf{B} (*магнитного потока*) не отличается от определения потока вектора \mathbf{E} (см. (5)). Поток через элементарную площадку dS равен

$$d\Phi = \mathbf{B} d\mathbf{S} = B_n dS,$$

а через произвольную поверхность S – интегралу по этой поверхности

$$\Phi = \int_S B_n dS. \quad (10).$$

Единица магнитного потока - *вебер*: $1 \text{ Вб} = \text{Тл}\cdot\text{м}^2$.

3. Электромагнитная индукция

Электромагнитная индукция – явление возникновения электрического поля, электрического тока при изменении во времени магнитного поля или при движении проводника в магнитном поле. Это явление было открыто и изучено М.Фарадеем (1831 г.).

Опытами было показано, что причиной появления в проводящем контуре индукционного тока является изменение магнитного потока через площадь, ограниченную контуром. Ток является следствием возникновения в контуре электродвижущей силы (ЭДС) индукции \mathcal{E}_i , которая пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную контуром:

$$\mathcal{E}_i = - d\Phi / dt. \quad (11)$$

Формула (11) выражает *закон Фарадея для электромагнитной индукции*.

Электродвижущей силой называют отношение работы, совершаемой *сторонними силами* по перемещению заряда, к величине заряда

$$\mathcal{E}_i = A_{\text{стор}} / q. \quad (12)$$

Известно несколько различных сторонних сил, но все они отличаются от силы, действующей на заряд в электростатическом поле.

Определения ЭДС (12) и напряжения $U = A / q$ схожи, но различаются природой сил, совершающих работу: в первом случае – сторонние, во втором – кулоновские.

Направление индукционного тока определяется **правилом (законом) Ленца**: индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей.

Знак минус в формуле (11) соответствует этому правилу. Приведем пример для пояснения, как пользоваться знаком «минус». Пусть положительное направление нормали n к контуру совпадает с направлением магнитной индукции (рис. 10). Тогда поток сквозь контур будет положительным. Положительное направление тока определяется выбором направления нормали и правилом правого винта. Если теперь магнитное поле увеличивается, т.е. $d\Phi/dt > 0$, то, согласно (11), $\mathcal{E}_i < 0$, а, следовательно, и $I < 0$. Это означает, что направление индукционного тока противоположно выбранному нами положительному направлению.

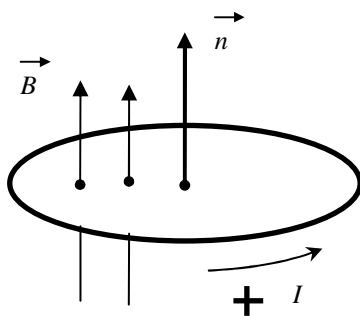


Рис. 10. К пояснению правила Ленца

4. Природа сторонних сил в движущемся проводнике

Магнитный поток $\Phi = BS \cos \alpha$ может изменяться как за счет изменения магнитного поля при неизменной величине $S \cos \alpha$ (случай неподвижных проводников), так и при движении проводников в постоянном магнитном поле. В этих двух случаях природа сторонних сил различная.

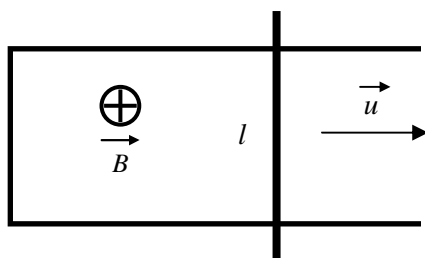


Рис. 11. Электромагнитная индукция в движущемся проводнике

Применим закон (11) к случаю движения проводника в однородном, постоянном магнитном поле. Рассмотрим прямоугольный контур, одна сторона которого длиной l движется со скоростью u (рис. 11). Линии индукции перпендикулярны плоскости контура. За время dt площадь контура увеличится на $dS = l u dt$, а магнитный поток увеличится на $d\Phi = B l u dt$. Тогда из (11) следует, что в контуре возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = - B l u. \quad (13)$$

Рассмотрим природу сторонних сил в этом случае. Электроны проводимости, находящиеся в движущемся проводнике, движутся вместе с ним в магнитном поле со скоростью u (рис.12). При этом на электрон с зарядом e действует магнитная сила (сила Лоренца) (см. (8))

$$F_M = euB.$$

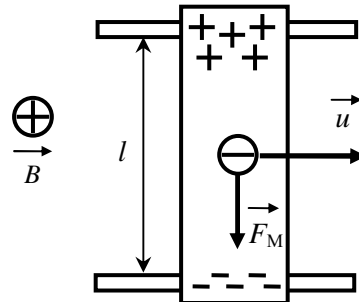


Рис. 12. К объяснению природы сторонних сил в движущемся проводнике

Магнитная сила действует только в движущейся перемычке, она перемещает электрон вдоль нее на расстояние l и совершает работу, равную $A = F_M l = euBl$. Работа сил по перемещению многих электронов с суммарным зарядом q равна

$$A_{\text{стор}} = quBl,$$

а ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = A_{\text{стор}} / q = Blu. \quad (14)$$

Совпадение формул (13) и (14) проясняет природу сторонних сил: *при движении проводника в постоянном магнитном поле сторонней силой служит магнитная сила $\mathbf{F}_M = q [\mathbf{v} \mathbf{B}]$.*

Природа сторонних сил в переменном магнитном поле рассмотрена ниже.

5. Вихревое электрическое поле

Если провод неподвижен, а магнитное поле переменное, то в пространстве (в проводнике, в частности) возникает особое электрическое поле, называемое *вихревым электрическим полем*. Оно было открыто теоретически Максвеллом.

Вихревое электрическое поле отличается от электростатического (потенциального) следующими свойствами: источником поля служат не заряды, а магнитное поле; в вихревом электрическом поле силовые линии – *замкнутые*, а *работа по перемещению заряда по замкнутой линии не равна нулю*.

Рассмотрим подробнее вихревое электрическое поле на следующем примере. Пусть однородное переменное магнитное поле с индукцией $B(t)$ создается внутри длинного соленоида С, по проводам которого протекает переменный ток. В этом поле находится неподвижное проволочное кольцо К радиусом r и площадью S (рис. 13). Линии магнитной индукции направлены вдоль оси соленоида и перпендикулярны плоскости кольца. Согласно (11), в кольце возникает ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = - d\Phi/dt = - S dB/dt. \quad (15)$$

Вследствие осевой симметрии, замкнутые линии напряженности вихревого электрического поля представляют собой окружности (см. рис. 13). Вектор \mathbf{E} направлен по касательной к окружности, а его модуль E постоянен на данной окружности. На заряд q в кольце действует сила qE , которая при перемещении заряда по кольцу длиной L совершает стороннюю работу

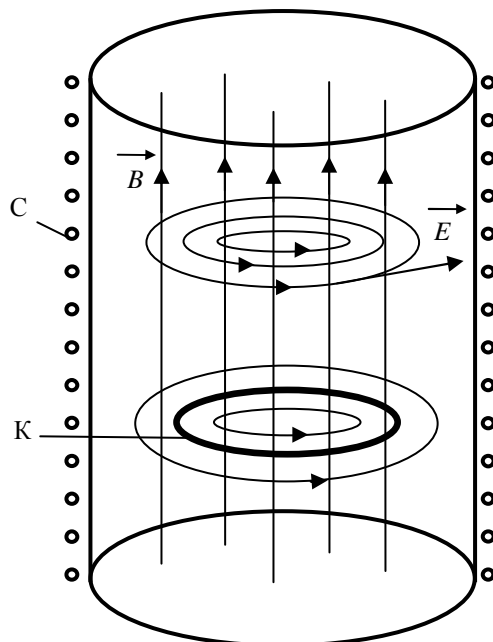


Рис. 13. Возникновение вихревого электрического поля в переменном магнитном поле.

$$A_{\text{стор}} = qEL.$$

Следовательно, ЭДС в кольце равна произведению напряженности вихревого электрического поля на длину кольца

$$\varepsilon_i = A_{\text{стор}} / q = EL. \quad (16)$$

Объединяя формулы (15) и (16), получим

$$EL = -S dB/dt. \quad (17)$$

Если ток в соленоиде изменяется по гармоническому закону с циклической частотой ω ($\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$), то и магнитная индукция будет изменяться с такой же частотой

$$B = B_m \sin \omega t, \quad (18)$$

где B_m – максимальное значение (амплитуда). Тогда $dB/dt = \omega B_m \cos \omega t$. Для нахождения напряженности вихревого электрического поля на расстоянии r от оси соленоида подставим в (17) $L = 2\pi r$ и $S = \pi r^2$, тогда

$$E(t) = - (r/2) \omega B_m \cos \omega t = - E_m \cos \omega t, \quad (19)$$

где

$$E_m = \omega B_m r/2 \quad (20)$$

представляет амплитуду электрического поля.

Напряженность вихревого электрического поля пропорциональна частоте тока. Она может достигать больших значений в магнитных полях, создаваемых токами высокой частоты радиодиапазона.

Формула (17) записана для частного случая однородного магнитного поля с осевой симметрией, когда линии вихревого электрического поля – окружности. Приведем общее выражение. Рассмотрим произвольный контур К (замкнутую линию, не обязательно - провод) в произвольном переменном магнитном поле (рис. 14). Вихревое электрическое поле \mathbf{E} изображено замкнутыми тонкими линиями. Работа сил электрического вихревого поля по перемещению единичного заряда вдоль контура К на малое перемещение $d\mathbf{l}$ равна $E_t d\mathbf{l}$, где E_t – проекция вектора \mathbf{E} на элемент кон-

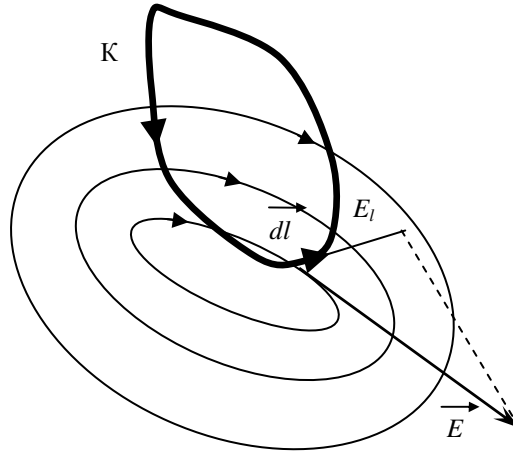


Рис. 14. К выводу формулы (21)

тура $d\mathbf{l}$. Работа по всему контуру, т.е. ЭДС, равна интегралу $\oint E_t d\mathbf{l}$.

Этот интеграл по замкнутой линии называют *циркуляцией* вектора \mathbf{E} . Тогда вместо (17) записываем

$$\oint E_t d\mathbf{l} = - \int_S (dB_n / dt) dS. \quad (21)$$

Второй интеграл, равный $d\Phi/dt$, берется по произвольной поверхности, натянутой на контур К.

Если контур К проволочный, то возникающая в нем ЭДС равна $\mathcal{E}_i = \oint E_t d\mathbf{l}$

Формула (21) является основным *уравнением Максвелла* и выражает важнейшее свойство электромагнитного поля: **в переменном магнитном поле возникает вихревое электрическое поле.**

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики вихревого и потенциального электрических полей.

Характеристика	Вихревое поле	Потенциальное поле
Источник поля	Переменное магнитное поле	Электрический заряд
Линии поля	Замкнутые	Незамкнутые
Работа сил поля по замкнутой линии	Работа не равна нулю	Работа равна нулю
Циркуляция вектора \mathbf{E}	$\oint E_l dl \neq 0$	$\oint E_l dl = 0$

6. Примеры использования вихревого электрического поля

Вихревое электрическое поле есть электрическая *компонента электромагнитных волн*. Рассмотрение волн не входит в данную работу. Поэтому ограничимся несколькими примерами технического использования вихревого поля.

Вихревые токи. Если в переменном магнитном поле находится какой-либо массивный проводник, то вихревое электрическое поле вызывает в нем индукционный ток. Плотность этого тока в какой-либо точке проводника по закону Ома в дифференциальной форме равна $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$, где \mathbf{E} – напряженность поля, а σ – удельная электропроводность. Так как линии напряженности \mathbf{E} замкнуты, то и линии тока также замыкаются внутри проводника, отчего такие токи получили название *вихревых токов*.

Вихревые токи вызывают нагревание проводников. Если внутри катушки с переменным током поместить проводящее тело, то его можно раскалить до высокой температуры и расплавить. Такой нагрев применяют в индукционных металлургических печах для плавления металлов и приготовления их сплавов, для закалки металлов и во многих других случаях.

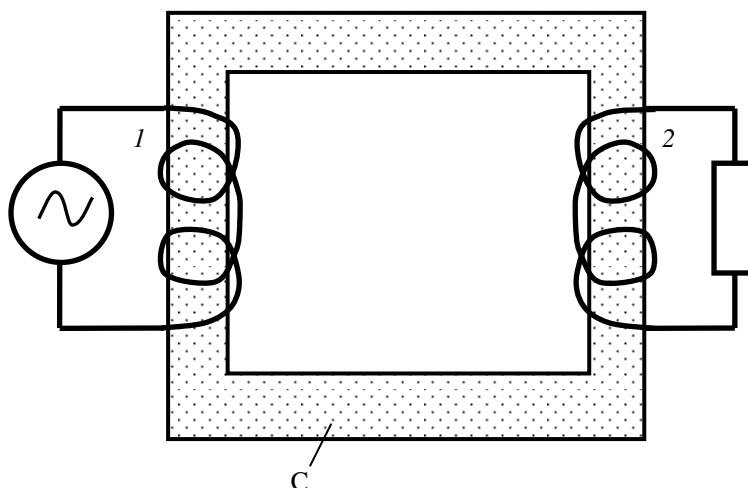


Рис. 15. Схема трансформатора: С – железный сердечник

Трансформатор. Трансформатор представляет собой устройство, предназначенное для преобразования напряжения и силы переменного тока. Он имеет железный сердечник С замкнутой формы, который несет на себе две обмотки – первичную и вторичную (рис. 15). Концы первичной обмотки подключены к сети питающего переменного тока, а концы вторичной обмотки – к потребителю электрической энергии.

Трансформатор является хорошим примером технического использования вихревого электрического поля. Переменный ток в первичной обмотке создает переменное магнитное поле, со-

средоточенное в железном сердечнике. Это поле порождает вихревое электрическое поле, которое приводит в движение электроны во вторичной обмотке и служит причиной возникновения в ней ЭДС.

Вихревое электрическое поле возникает также и в сердечнике, создавая в нем вихревые токи. В трансформаторе эти токи - вредные, они нагревают сердечник, приводят к бесполезным потерям энергии. Для борьбы с ними сердечник набирают из тонких листов, изолированных друг от друга, или используют непроводящие ферромагнетики - ферриты.

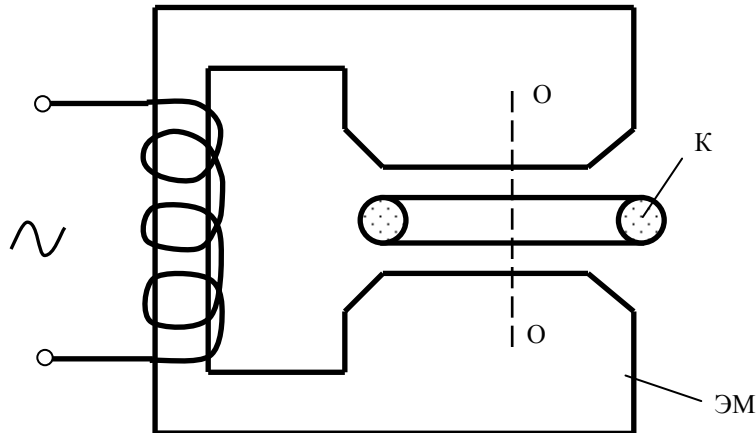


Рис. 16. Схема бета-трона: ЭМ – электромагнит; К – откачанная тороидальная камера

Индукционный ускоритель. Вихревое электрическое поле получило замечательное применение в индукционных ускорителях, или *бета-тронах*, предназначенных для получения пучков электронов большой энергии - на два порядка больше, чем при радиоактивном распаде.

Схема устройства индукционного ускорителя изображена на рис. 16. Основной его частью является большой электромагнит ЭМ. Создаваемое им в зазоре магнитное поле симметрично относительно оси ОО. Обмотка электромагнита питается переменным током частотой порядка сотен герц. Между полюсами электромагнита находится камера К в форме тороида, откачиваемая до высокого вакуума.

Зависимости от времени магнитной индукции B и напряженности E вихревого электрического поля в зазоре электромагнита определяются соотношениями (18)-(20) и показаны на рис. 17. Линии напряженности вихревого электрического поля – окружности; по одной из них радиуса r движутся электроны. В определенные моменты времени, когда $B \approx 0$, в камеру впрыскивают электроны небольшой энергии. На каждый из электронов действует сила eE , направленная по касательной к окружности. Так как линии напряженности электрического поля окружности, то направление силы будет все время совпадать с направлением движения по окружности. Электрическое поле совершает работу, увеличивая кинетическую энергию электронов. За время нарастания магнитного поля ($\sim 10^{-3}$ с) электроны успевают сделать много оборотов и приобрести энергию, достигающую сотен МэВ.

Траектория электронов искривляется магнитной силой (см. (8)). С ростом импульса электрона растет и магнитная индукция, что позволяет удерживать электроны на окружности постоянного радиуса.

Цикл ускорения занимает одну четвертую часть периода колебаний T магнитного поля. Начало цикла отмечено звездочкой на оси времени (см.рис. 17), окончание – при достижении максимальной индукции.

Индукционный ускоритель подобен трансформатору, у которого роль вторичной обмотки из одного витка играет пучок электронов в камере.

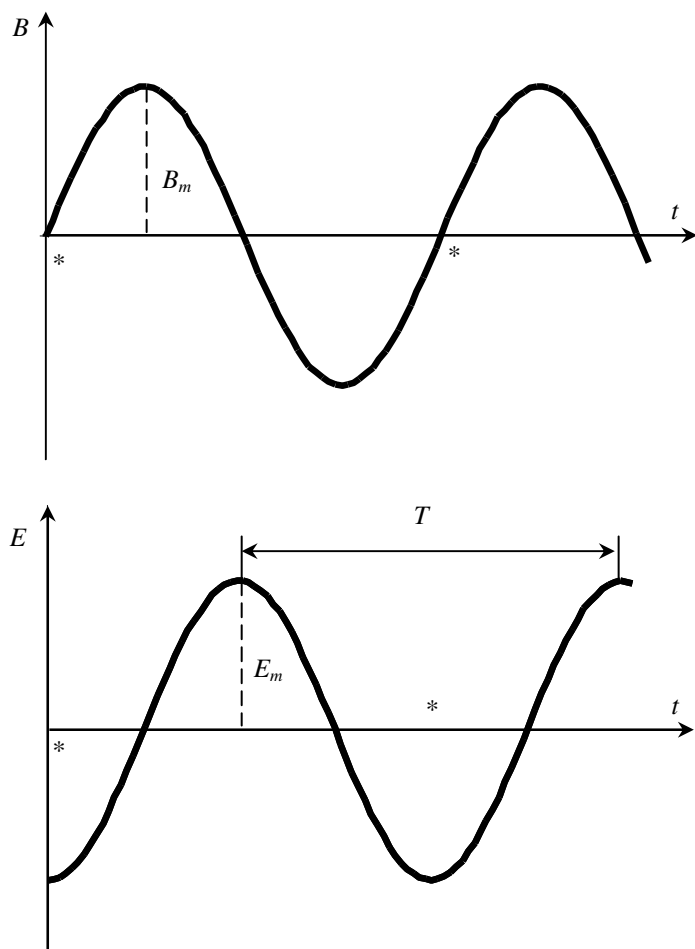


Рис. 17. Графики изменения магнитного и вихревого электрического поля в бетатроне.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В практической части работы наблюдают свечение газового разряда в вихревом и потенциальном электрических полях, а также выполняют расчетные задания.

1. Газовый разряд в вихревом и потенциальном электрических полях

Газовым разрядом называют прохождение электрического тока через газ, которое часто сопровождается свечением газа. В экспериментальной части работы знакомятся с вихревым электрическим полем с помощью газоразрядной трубки, помещенной в высокочастотное магнитное поле [4].

Широкое распространение получили газоразрядные осветительные лампы в виде длинных трубок, наполненных разреженным газом и парами ртути. Внутренняя поверхность трубки покрыта люминофором, который испускает видимый свет под воздействием ультрафиолетовых (УФ) лучей газового разряда. Такие лампы называются люминесцентными.

Такие же трубки, но без люминофора, изготовлены из специального стекла, прозрачного для УФ лучей. В них светится газ, который испускает преимущественно УФ лучи, а также видимый свет. Эти лампы обладают бактерицидным свойством. В установке используются такие бактерицидные лампы, в которых свечение газа происходит в местах с достаточно сильным электрическим полем. Наблюдаемое свечение служит *индикатором* электрического поля.

Разряд в потенциальном поле. Упрощенная схема наблюдения разряда в потенциальном поле показана на рис. 18. На концах трубки имеются два электрода, к которым подключают напряжение порядка 100 В. На электродах накапливаются заряды противоположного знака, которые создают потенциальное поле.

Газы в естественном состоянии практически не проводят электрический ток, так как в них очень мало заряженных частиц. Заряды могут возникнуть в результате отрыва электрона от атома; при этом образуются свободный отрицательный электрон и положительный ион. Этот процесс называется *ионизацией* атома. Ионизация может происходить при высокой температуре, под действием ультрафиолетовых лучей и ионизирующих излучений, а также при столкновении быстрого электрона с атомом.

Для ионизации атома необходимо затратить определенную энергию, различную для разных атомов; по порядку величины она равна 10 эВ (1 электрон-вольт – это энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов 1 В).

Если газ ионизирован, в нем происходит обратный процесс – присоединение электрона к иону с образованием нейтрального атома. Этот процесс называется *рекомбинацией ионов*. При рекомбинации освобождается энергия, равная энергии, затраченной на ионизацию. Частично она излучается в виде света. Если концентрация ионов и электронов велика, свечение может быть сильным.

При работе лампы в ней возникают процессы, приводящие к образованию большого количества ионов и электронов. При этом большую роль играет *ионизация атомов электронными ударами*.

Электроны и ионы в небольшом количестве всегда образуются под действием естественных источников ионизации. Рассмотрим движение электрона, возникшего вблизи отрицательного электрода (см. рис.18). В электрическом поле на электрон действует сила, разгоняющая его. Если поле достаточно сильное, а газ разрежен, электрон до столкновения с атомом может набрать энергию, достаточную для ионизации атома. Тогда, кроме иона, возникнет еще один электрон. Два электрона после ускорения и соударения с атомами создадут четыре электрона и т.д. Этот *лавинообразный* процесс приводит к образованию большого количества заряженных частиц, создающих значительный ток лампы. Рекомбинационное свечение ионов наблюдается практически во всей трубке.

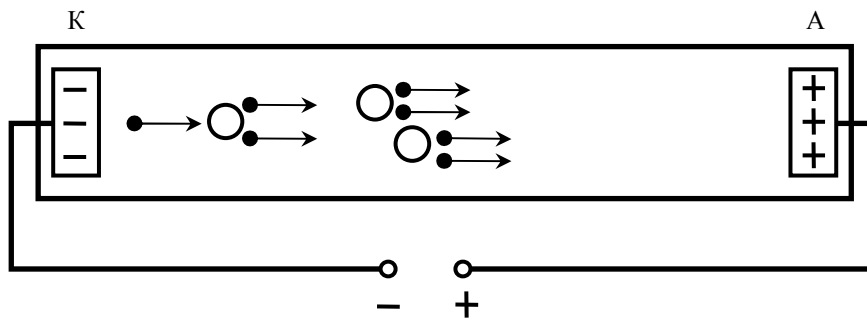


Рис. 18. Схема газового разряда в потенциальном электрическом поле: К – катод; А – анод.

Разряд в вихревом электрическом пол. Схема показана на рис. 19. На электроды лампы напряжение не подается; электроды могли бы вообще отсутствовать. Вокруг лампы намотано несколько витков провода, по которому пропускают переменный ток высокой частоты (40 МГц). В переменном магнитном поле возникает вихревое электрическое поле. Электроны ускоряются электрическим полем, а отклоняются магнитным полем. Их движение происходит по кривым траекториям в поперечных плоскостях лампы. В местах с достаточно сильным электрическим вихревым полем происходит лавинообразное размножение электронов и рекомбинационное свечение газа.

Магнитное и вихревое электрические поля возникают преимущественно внутри витков и вблизи от них; там и наблюдается свечение газа. Если же поля сильные, светиться может вся трубка.

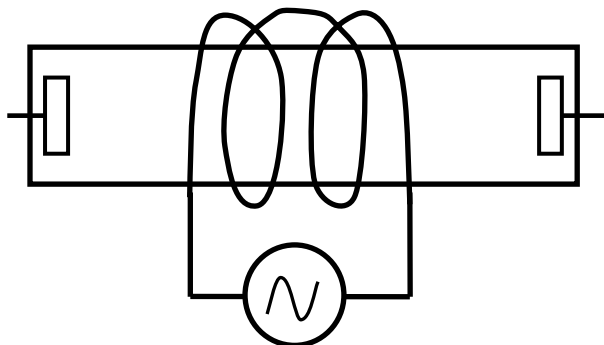


Рис. 19. Схема демонстрации разряда в вихревом электрическом поле

2. Описание лабораторной установки и выполнение работы

В лабораторной установке (рис. 20) используются две одинаковые бактерицидные лампы для демонстрации разряда в вихревом поле (лампа 3) и в потенциальном поле (лампа 4).

Вихревое электрическое поле. Вокруг лампы 3 намотано несколько витков провода 2, через которые пропускают ток высокой частоты (40 МГц) от электронной схемы 1, выполненной на радиолампе.

Порядок выполнения задания.

1. Зарисовать в отчете схему опыта (см. рис. 19).
2. **Выключить** (положение - к себе) все тумблеры.
3. Вставить сетевую вилку в розетку.
4. Включить тумблер 10 «СЕТЬ»; при этом должен загореться индикатор 9.
5. Для разряда в вихревом поле нажать и **удерживать** кнопку 14 «ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ». Для зажигания разряда необходимо установить максимальное поле. Для этого ручку 13 «ВИХРЕВОЕ ПОЛЕ» повернуть по часовой стрелке до упора. Спустя несколько секунд, необходимых для разогрева радиолампы, может возникнуть свечение лампы.

Примечание. Обычно разряд труднее зажечь, чем поддерживать. Поэтому в газоразрядных лампах предусматривают специальные меры для начала разряда, например, создают кратковременную повышенную напряженность поля. Если лампа 3 не загорается, помочь может другая лампа, ультрафиолетовое излучение которой вызовет ионизацию в лампе 3. Включить лампу 4 тумблером 11 «ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ПОЛЕ». Если лампа 3 загорелась, вторую лампу выключить.

6. Когда лампа 3 загорится, свечение может охватить всю лампу. Однако демонстрация вихревого электрического поля будет более убедительной, если свечение останется только в середине трубки вблизи витков. В этом случае медленно повернуть назад ручку 13 «ВИХРЕВОЕ ПОЛЕ» для уменьшения напряженности поля.

7. Если у Вас имеется фотокамера, попытайтесь сфотографировать разряд.

8. Выключить лампу, отпустив кнопку 14 «ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ».

Потенциальное электрическое поле. Разряд в электростатическом (потенциальном) поле наблюдают в лампе 4. На электроды лампы подают переменное сетевое напряжение частотой 50 Гц. Пускорегулирующее устройство 5 ограничивает ток лампы и создает благоприятные условия для зажигания разряда.

Порядок выполнения задания.

1. Включить тумблер 11 «ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ПОЛЕ». В лампе 4 должен возникнуть разряд.

2. Выключить лампу.

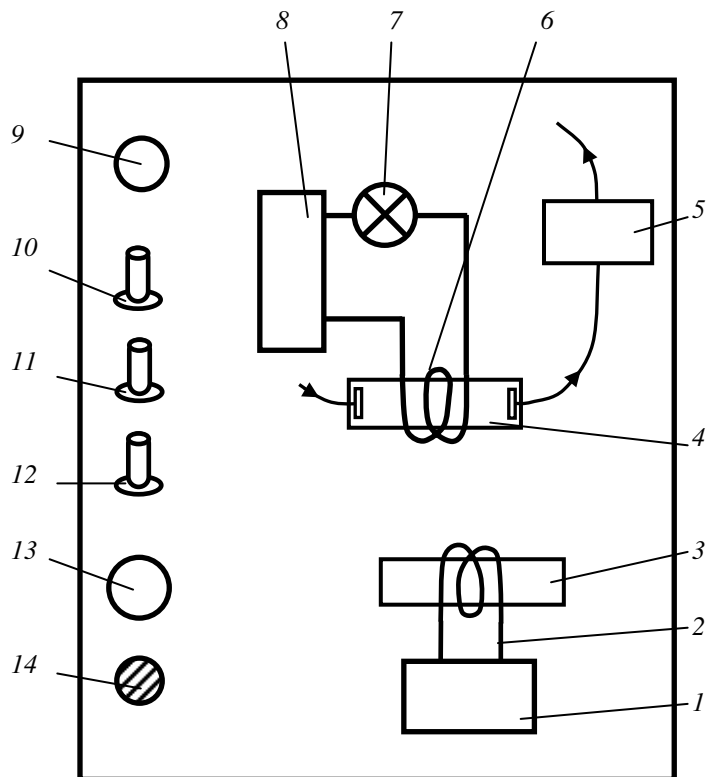


Рис. 20. Лабораторная установка: 1 - генератор тока высокой частоты; 2 - витки; 3 – лампа для демонстрации разряда в вихревом поле; 4 - лампа для демонстрации разряда в потенциальном поле; 5 – пускорегулирующее устройство; 6 – витки; 7 – индикаторная лампа; 8 – источник постоянного тока; 9 – индикатор сети; 10 – сетевой выключатель; 11 – тумблер включения разряда в потенциальном поле; 12 - тумблер включения постоянного магнитного поля; 13 – регулировка вихревого электрического поля; 14 – кнопка включения разряда в вихревом электрическом поле

Отсутствие разряда в постоянном магнитном поле. Вокруг лампы 4 намотано несколько витков провода 6, через которые можно пропустить сильный постоянный ток от источника 8 (см. рис. 20). В катушке возникает постоянное магнитное поле, однако свечения газа при этом нет. Этот опыт демонстрирует, что постоянное магнитное поле не порождает электрического поля.

Порядок выполнения задания.

1. Включить тумблер 12 «ПОСТОЯННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ», при этом пойдет ток через витки и лампу накаливания 7, которая служит индикатором тока.
2. Выключить ток.
3. Составить отчет по проделанным опытам.

3. Расчетные задания

Два простых расчетных задания предназначены для закрепления теоретических сведений.

Задание 1. Расчет силы тока, необходимого для разряда в вихревом поле

Условия. Предположим, что для зажигания разряда необходима напряженность вихревого электрического поля $E_m = 1000$ В/м у поверхности газоразрядной трубки на расстоянии $r = 0,01$ м от оси лампы. Частота переменного тока $\nu = 40$ МГц. Считать, что лампа находится в длинном соленоиде, для которого $n = 400$ витков на метр.

Вычислить необходимые для разряда амплитуды магнитной индукции B_m и силы тока I_m .

Порядок выполнения задания.

1. Для расчета воспользоваться формулами (9) и (20).
2. Результаты расчета представить в табл. 2.

Таблица 2

B_m , Тл	I_m , А

Задание 2. Расчет бетатрона

Условия: в бетатроне электроны разгоняются до кинетической энергии $W = 75$ МэВ, двигаясь по орбите радиуса $r = 0,5$ м в однородном переменном магнитном поле частотой $\nu = 250$ Гц и максимальной индукцией $B_m = 0,5$ Тл.

Вычислить: максимальную напряженность вихревого электрического поля E_m , В/м; среднюю за четверть периода напряженность вихревого электрического поля $\langle E \rangle$, В/м; расстояние l , пройденное электроном за цикл ускорения; число оборотов N в цикле.

Порядок выполнения задания.

1. Привести в отчете рис. 16 и 17.
2. Для расчета E_m применить формулу (20).
3. Соотношение между $\langle E \rangle$ и E_m вывести самостоятельно.
4. Для нахождения l удобно не переводить энергию 75 МэВ в джоули, а воспользоваться определением электрон-вольта: 1 эВ – это энергия, приобретаемая электроном при прохождении в электрическом поле разности потенциалов (или ЭДС) 1 В. Следовательно, на каждом обороте электрон приобретает дополнительную энергию, равную в среднем $2\pi l \langle E \rangle$ электрон-вольт.
5. Результаты расчета представить в табл. 3.

Таблица 3

E_m , В/м	$\langle E \rangle$, В/м	l , м	N

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Дать определения напряженности электрического поля \mathbf{E} и магнитной индукции \mathbf{B} .
2. Сформулировать закон Кулона.
3. Что такое линии векторов \mathbf{E} и \mathbf{B} ? Какими свойствами обладают линии электрических полей (потенциального и вихревого) и магнитного поля?
4. Дать определение потока векторной величины.
5. Сформулировать теорему Гаусса для электрического поля.
6. В чем состоит явление электромагнитной индукции?
7. Сформулировать закон Фарадея для электромагнитной индукции.
8. Пояснить правило Ленца.
9. Дать определение электродвижущей силы (ЭДС).
10. Какова природа сторонних сил: а) в переменном магнитном поле? б) в проводнике, движущемся в постоянном магнитном поле?
11. Какими свойствами обладает вихревое электрическое поле? Чем оно отличается от электростатического поля?
12. Объяснить формулу (21).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Калашиников С.Г.* Электричество: Учебное пособие. - М.: Наука. 1985.-576с.
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. т.2.- М.: Наука. 1978.-480 с.
3. *Иродов И.Е.* Основные законы электромагнетизма: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. шк., 1983.-279 с.
4. *Фетисов И.Н.* Демонстрация вихревого электрического поля с помощью высокочастотного индукционного разряда: Современный физический практикум. Сборник тезисов докладов VII учебно-методической конференции стран Содружества. Санкт-Петербург. 2002 г. Издательский дом Московского физического общества. М. 2002. с. 175.