

10. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Вектор магнитной индукции. Линии магнитной индукции

Вектор магнитной индукции \vec{B} (Тл) — силовая характеристика магнитного поля.

Модуль вектора магнитной индукции — физическая величина, равная отношению максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока и длины проводника: $B = \frac{F_{Amax}}{Il}$.

Вектор напряженности магнитного поля \vec{H} (А/м):

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0},$$

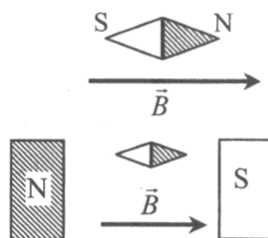
где μ — магнитная проницаемость среды (у воздуха $\mu = 1$); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная. Направление напряженности \vec{H} совпадает с направлением вектора магнитной индукции, т. е. $\vec{H} \uparrow\uparrow \vec{B}$.

Способы определения направления вектора магнитной индукции (или напряженности)

1. С помощью постоянных магнитов:

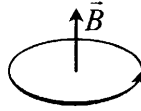
1) направление вектора магнитной индукции \vec{B} совпадает с направлением на север магнитной стрелки;

2) в пространстве между полюсами постоянного магнита вектор магнитной индукции \vec{B} выходит из северного полюса.

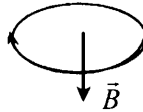


2. При определении направления вектора магнитной индукции с помощью витка с током следует применять правило буравчика:

1) если по витку ток идет против часовой стрелки, то вектор магнитной индукции \vec{B} направлен вверх;



2) если ток идет по часовой стрелке, то вектор магнитной индукции \vec{B} направлен вниз.



Обозначения направлений векторов

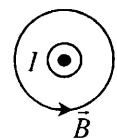
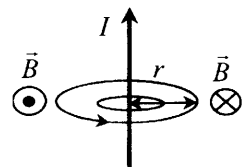
Вверх ↑	Вниз ↓	Вправо →
Влево ←	На нас ⊥ плоскости чертежа 	От нас ⊥ плоскости чертежа

Линии магнитной индукции — линии, касательные к которым в любой точке пространства совпадают с направлением вектора магнитной индукции. Чем гуще линии магнитной индукции, тем сильнее поле. Направление вектора магнитной индукции определяется *правилом буравчика*.

Магнитное поле прямолинейного тока

1. Линии магнитной индукции представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной проводнику. Центр окружностей совпадает с осью проводника.

2. Если ток идет вверх, то силовые линии направлены против часовой стрелки; если вниз, то по часовой стрелке.



Вид сверху

Вектор магнитной индукции на расстоянии r от оси проводника:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}.$$

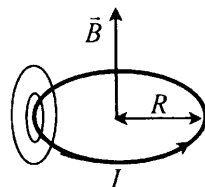
а напряженность

$$H = \frac{I}{2\pi r}.$$

Магнитное поле кругового тока

1. Линии представляют собой окружности, опоясывающие круговой ток.

2. Вектор магнитной индукции в центре витка направлен вверх, если ток идет против часовой стрелки, и вниз, если по часовой стрелке.



Вектор магнитной индукции в центре витка, радиус которого R :

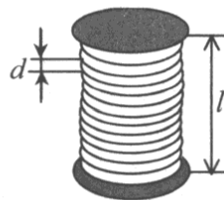
$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R},$$

а напряженность в центре витка

$$H = \frac{I}{2R}.$$

Магнитное поле электромагнита (соленоида)

1. Линии магнитной индукции являются замкнутыми, причем внутри соленоида они располагаются параллельно друг другу. Поле внутри соленоида *однородно* ($N = \frac{l}{d}$ — число витков, l — длина соленоида, d — диаметр проволоки).



2. Если ток по виткам соленоида идет против часовой стрелки, то вектор магнитной индукции \vec{B} внутри соленоида направлен вверх; если по часовой стрелке, то вниз.

Вектор магнитной индукции в центральной области соленоида:

$$B = \frac{\mu\mu_0 IN}{l} = \frac{\mu\mu_0 I}{d},$$

а напряженность

$$H = \frac{IN}{l} = \frac{I}{d}.$$

Алгоритм определения полярности электромагнита

1. Определить полярность источника.
2. Указать на витках электромагнита условное направление тока (от «+» источника к «-»).

3. Определить направление вектора магнитной индукции с помощью правила буравчика.

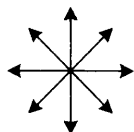
Если по виткам ток идет против часовой стрелки, то линии магнитной индукции направлены вверх; если по часовой стрелке, то вниз.

4. Определить полюса электромагнита. Там, откуда выходят линии магнитной индукции, располагается северный полюс электромагнита. С противоположной стороны — южный.

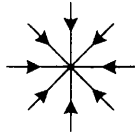
ЗАДАЧИ

1. На каком рисунке правильно изображена картина линий индукции магнитного поля длинного проводника с постоянным током, направленным перпендикулярно плоскости чертежа на нас?

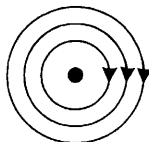
1)



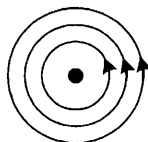
2)



3)

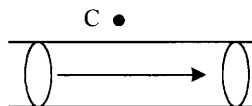


4)



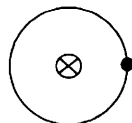
Ответ: _____

2. На рисунке изображен проводник, по которому течет электрический ток. Направление тока указано стрелкой. Как направлен (вверх, вниз, влево, вправо, от наблюдателя, к наблюдателю) вектор магнитной индукции в точке С?



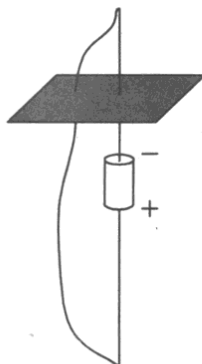
Ответ: _____

3. По проводнику течет ток от нас. Как направлен (*вверх, вниз, влево, вправо*) вектор индукции магнитного поля в точке, находящейся справа от проводника?



Ответ: _____

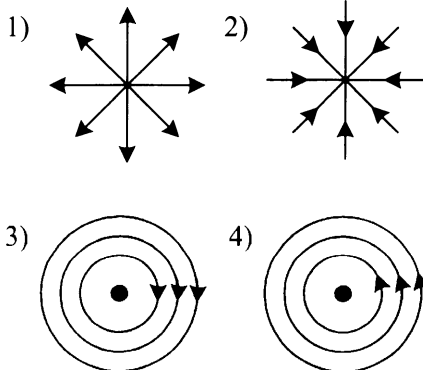
4. При подключении проводника к полюсам гальванического элемента на поверхности проводника появляются заряды: положительные вблизи положительного полюса, отрицательные вблизи отрицательного полюса — и возникает электрический ток. Заряды на поверхности проводника создают в пространстве электрическое поле, а ток — магнитное поле. Проводник, подключенный к гальваническому элементу, проходит через отверстие в доске. На рисунках 1–4 при помощи силовых линий (линий поля) изображены электрическое и магнитное поля, создаваемые проводником (вид сверху).



ВИД ПОЛЯ

- А) электрическое поле
Б) магнитное поле

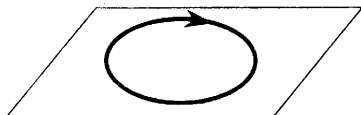
ИЗОБРАЖЕНИЕ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ



Ответ:

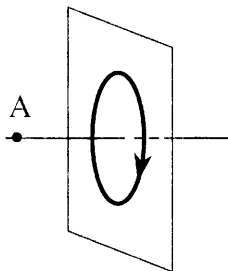
А	Б

5. На рисунке изображен проволочный виток, по которому течет электрический ток в направлении, указанном стрелкой. Виток расположен в горизонтальной плоскости. Какое направление (*вверх, вниз, влево, вправо*) имеет вектор магнитной индукции в центре витка?



Ответ: _____

6. На рисунке изображен проволочный виток, по которому течет электрический ток в направлении, указанном стрелкой. Виток расположен в вертикальной плоскости. Точка А находится на горизонтальной прямой, проходящей через центр витка. Как направлен (*вверх, вниз, влево, вправо*) вектор индукции магнитного поля тока в точке А?



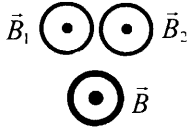
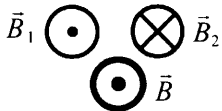
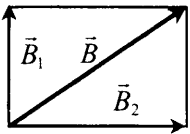
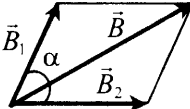
Ответ: _____

Принцип суперпозиции полей

Если в некоторой точке пространства накладываются магнитные поля, то результирующий вектор магнитной индукции находят как геометрическую сумму векторов магнитной индукции, составляющих магнитное поле:

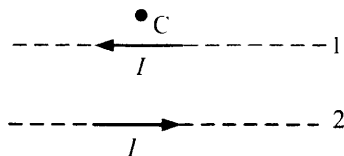
$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i.$$

Частные случаи принципа суперпозиции полей

Сложение векторов магнитной индукции, направленных вдоль одной прямой	
	Если $\vec{B}_1 \uparrow \uparrow \vec{B}_2$, то $B = B_1 + B_2$
	Если $\vec{B}_1 \uparrow \downarrow \vec{B}_2$, $B_1 > B_2$, то $B = B_1 - B_2 $
Сложение векторов магнитной индукции, перпендикулярных друг другу	
	Если $\vec{B}_1 \perp \vec{B}_2$, то по теореме Пифагора $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$
Сложение векторов магнитной индукции, направленных под углом α друг к другу	
	По теореме косинусов $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 - 2B_1B_2 \cos(180^\circ - \alpha)}$

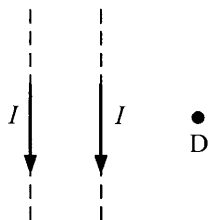
ЗАДАЧИ

7. По двум тонким прямым проводникам, параллельным друг другу, текут одинаковые токи I (см. рисунок). Как направлено (*вверх, вниз, влево, вправо, от наблюдателя, к наблюдателю*) создаваемое ими магнитное поле в точке C ?



Ответ:

8. По двум тонким прямым проводникам, параллельным друг другу, текут одинаковые токи I (см. рисунок), направление которых указано стрелками. Как направлен (*вверх, вниз, влево, вправо, от наблюдателя, к наблюдателю*) вектор индукции создаваемого ими магнитного поля в точке D?



Ответ: _____

Сила Ампера

Сила Ампера — сила, которая действует на проводник с током в магнитном поле:

$$F_A = BIl \sin \alpha ,$$

где B (Тл) — модуль вектора магнитной индукции; I (А) — сила тока; l (м) — длина проводника; α — угол между условным направлением тока и вектором магнитной индукции.

Внимание. Сила Ампера не действует на проводник, если он располагается параллельно силовым линиям магнитного поля, т.к. $\sin \alpha = 0$.

ЗАДАЧИ

9. С какой силой действует однородное магнитное поле с индукцией 2,5 Тл на проводник длиной 50 см, расположенный под углом 30° к вектору индукции, при силе тока в проводнике 0,5 А?

Ответ: _____ мН

10. Прямолинейный проводник длиной $l = 0,2$ м, по которому течет ток $I = 2$ А, находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,6$ Тл и расположен параллельно вектору \vec{B} . Каков модуль силы, действующей на проводник со стороны магнитного поля?

Ответ: _____ Н

11. Максимальная сила, действующая в однородном магнитном поле на проводник с током длиной 10 см равна 0,02 Н. Сила тока равна 8 А. Найдите модуль вектора магнитной индукции этого поля.

Ответ: ____ мТл

12. На проводник, расположенный в однородном магнитном поле под углом 30° к направлению линий магнитной индукции, действует сила F . Во сколько раз увеличится сила, действующая на проводник, если увеличить угол в 3 раза?

Ответ: в ____ раз(а)

13. Прямолинейный проводник длиной L с током I помещен в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции B . Во сколько раз увеличится сила Ампера, действующая на проводник, если силу тока уменьшить в 2 раза, а индукцию магнитного поля увеличить в 3 раза?

Ответ: в ____ раз(а)

14. Медный проводник расположен между полюсами постоянного магнита перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. Определите площадь поперечного сечения проводника, если сила Ампера, действующая на него, равна 5 Н, модуль вектора магнитной индукции магнитного поля 10 мТл, а напряжение, приложенное к концам проводника, 8,5 В. Удельное сопротивление меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-2}$ Ом \cdot мм²/м.

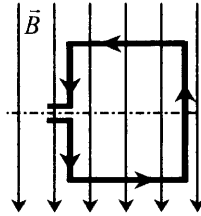
Ответ: ____ мм²

Направление силы Ампера определяется по *правилу левой руки*:

- 1) четыре пальца располагают по *условному* направлению тока;
- 2) вектор магнитной индукции входит в ладонь;
- 3) большой палец укажет направление силы Ампера.

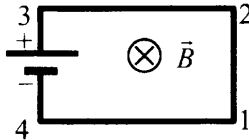
ЗАДАЧИ

15. В однородном магнитном поле находится рамка, по которой начинает течь ток (см. рисунок). Какое направление (*вверх, вниз, влево, вправо, от наблюдателя, к наблюдателю*) имеет сила, действующая на нижнюю сторону рамки?



Ответ: _____

16. Электрическая цепь, состоящая из четырех прямолинейных горизонтальных проводников (1–2, 2–3, 3–4, 4–1) и источника постоянного тока, находится в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции которого \vec{B} направлен вертикально вниз (см. рисунок, вид сверху). Куда направлена (*вверх, вниз, влево, вправо*) сила Ампера, действующая на проводник 1–2?



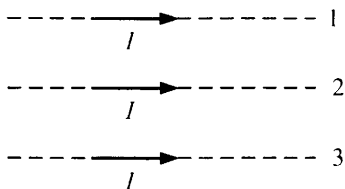
Ответ: _____

17. Силовые линии магнитного поля идут слева направо параллельно плоскости листа, проводник с электрическим током перпендикулярен плоскости листа, а ток течет в плоскость листа. Куда направлена (*вверх, вниз, влево, вправо*) сила Ампера, действующая на проводник?

Ответ: _____

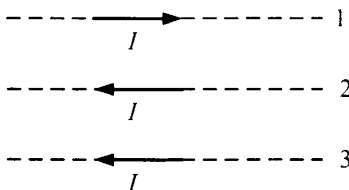
Учтите: если токи направлены в одну сторону, то проводники *притягиваются*, а если в противоположные, то *отталкиваются*.

18. Как направлена (*вверх, вниз, от наблюдателя, к наблюдателю*) сила Ампера, действующая на проводник № 1 со стороны двух других (см. рисунок), если все проводники тонкие, лежат в одной плоскости, параллельны друг другу и расстояния между соседними проводниками одинаковы? (I — сила тока).



Ответ: _____

19. Как направлена (*вверх, вниз, от наблюдателя, к наблюдателю*) сила Ампера, действующая на проводник № 3 со стороны двух других (см. рисунок)? Все проводники тонкие, лежат в одной плоскости и параллельны друг другу. По проводникам идет одинаковый ток силой I .



Ответ: _____

20. Установите соответствие между научными открытиями и именами ученых, которым эти открытия принадлежат.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОТКРЫТИЯ

ИМЕНА УЧЕНЫХ

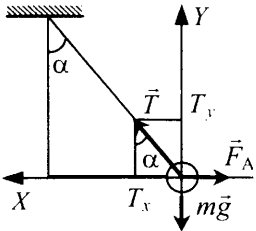
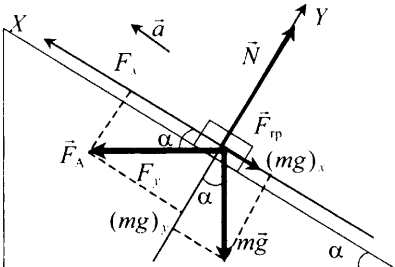
- А) закон магнитного взаимодействия параллельных проводников с током
 Б) закон, связывающий силу тока в проводнике и напряжение на концах проводника

- 1) А. Ампер
 2) Э. Х. Ленц
 3) Ш. Кулон
 4) Г. Ом
 5) М. Фарадей

Ответ:

А	Б

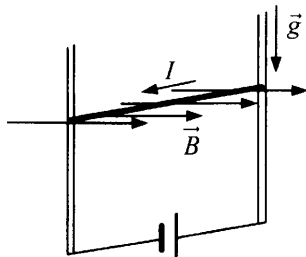
Подсказки к задачам

Задачи	Подсказки
<p>1. Проводник массой m и длиной l подвешен в горизонтальном положении в вертикальном магнитном поле индукцией \vec{B}. На какой угол α от вертикали отклонятся нити, на которых подвешен проводник, если по нему пропустить ток. Сила тока в проводнике I. Массой нитей пренебречь.</p> <p>Ответ: $\alpha = \arctg\left(\frac{BIl}{mg}\right)$</p>	 <p>Отклонение нитей от вертикали:</p> $0X : T_x - F_A = 0$ $0Y : T_y - mg = 0$ $F_A = mg \operatorname{tg} \alpha$
<p>2. Равноускоренное движение вверх под действием горизонтальной силы Ампера</p> <p><i>Второй закон Ньютона в векторной форме:</i></p> $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_A + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a}$ $0X : F_A \cos \alpha - mg \sin \alpha - F_{\text{тр}} = ma$ $0Y : N - F_A \sin \alpha - mg \cos \alpha = 0$	
<p>3. Определите работу A, совершаемую силой Ампера при перемещении проводника длиной l с током в однородном магнитном поле на расстояние s. Сила тока в проводнике I. Проводник расположен перпендикулярно линиям поля и движется в направлении силы Ампера. Индукция магнитного поля \vec{B}.</p> <p>Ответ: $A = BIl s$</p>	<p>Работа силы Ампера:</p> $A = F_A s \cos \alpha',$ <p>где α' — угол между направлением силы Ампера и перемещением; $F_A = BIl \sin \alpha$ — сила Ампера; α — угол между направлением вектора магнитной индукции и направлением тока</p>

Задачи	Подсказки
<p>4. Прямоугольную рамку со сторонами a и b поместили в магнитное поле так, что его линии индукции параллельны плоскости рамки. Когда по рамке пропустили электрический ток I, на нее стал действовать момент сил M. Чему равен модуль вектора индукции магнитного поля?</p> <p>Ответ: $B = M / Iab$</p>	<p>Момент силы Ампера</p> $M = BIab \sin \alpha,$ <p>В данной задаче:</p> $\sin \alpha = 1$

ЗАДАЧИ

21. В однородном магнитном поле по вертикальным направляющим без трения скользит прямой горизонтальный проводник массой $0,2$ кг, по которому течет ток 2 А. Вектор магнитной индукции направлен горизонтально перпендикулярно проводнику (см. рисунок), $B = 2$ Тл. Чему равна длина проводника, если известно, что ускорение проводника направлено вниз и равно 2 м/с²?



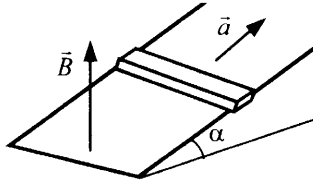
Ответ: _____ м

22. По прямому горизонтальному проводнику длиной 1 м с площадью поперечного сечения $1,25 \cdot 10^{-5}$ м², подвешенному с помощью двух одинаковых невесомых пружинок жесткостью 100 Н/м, течет ток 10 А. На какой угол от вертикали отклонятся пружины при включении вертикального магнитного поля с индукцией $0,1$ Тл, если абсолютное удлинение каждой из пружинок при

этом составляет $7 \cdot 10^{-3}$ м? (Плотность материала проводника $8 \cdot 10^3$ кг/м³.)

Ответ: _____ °

23. Горизонтальный проводящий стержень прямоугольного сечения поступательно движется с ускорением вверх по гладкой наклонной плоскости в вертикальном однородном магнитном поле (см. рисунок). По стержню протекает ток I . Угол наклона плоскости $\alpha = 30^\circ$. Отношение массы стержня к его длине $m/L = 0,1$ кг/м. Модуль индукции магнитного поля $B = 0,2$ Тл. Ускорение стержня $a = 1,9$ м/с². Чему равна сила тока в стержне? Ответ округлите до целых.



Ответ: _____ А

24. Участок проводника находится в магнитном поле, индукция которого 50 мТл. Сила электрического тока, протекающего по проводнику, равна 10 А. При перемещении проводника на 8 см в направлении действия силы Ампера поле совершает работу 0,004 Дж. Чему равна длина участка проводника? Проводник расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции.

Ответ: _____ см

Сила Лоренца

Сила Лоренца — сила, действующая на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле.

Сила Лоренца и сила Ампера создаются магнитным полем, но сила Лоренца действует на одну частицу, а сила Ампера на электрический ток, т.е. поток заряженных частиц:

$$F_{\perp} = \frac{F_A}{N} = \frac{BIl \sin \alpha}{nV} = \frac{BqnvSl \sin \alpha}{nV}$$

Модуль силы Лоренца:

$$F_{\perp} = qvB \sin \alpha.$$

Внимание. Сила Лоренца не действует:

- 1) на нейтральные частицы (нейтрон, атом, молекулу, фотон);
- 2) на неподвижные частицы;
- 3) на частицы, скорость которых параллельна направлению силовых линий.

ЗАДАЧИ

25. Электрон движется в вакууме со скоростью $3 \cdot 10^6$ м/с в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл. Чему равна сила, действующая на электрон, если угол между направлениями скорости электрона и линиями магнитной индукции равен 90° ? Заряд электрона равен $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Ответ умножьте на 10^{15} .

Ответ: ____ Н

26. Электрон и протон влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции со скоростями $2v$ и v . Модули зарядов электрона и протона равны. Определите отношение модуля силы, действующей со стороны магнитного поля на электрон, к модулю силы, действующей на протон, в этот момент времени.

Ответ: ____

27. Протон и α -частица влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции на расстоянии L друг от друга с одинаковыми скоростями v . Заряд протона в 2 раза меньше заряда α -частицы. Определите отношение модулей сил, действующих на них со стороны магнитного поля в этот момент времени.

Ответ: ____

28. Нейтрон ${}_0^1n$ и электрон ${}_{-1}^0e$ влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции со скоростями $2v$ и $4v$. Определите отношение $F_n : F_e$ модуля силы, действующей со стороны магнитного поля на нейтрон, к модулю силы, действующей на электрон, в этот момент времени.

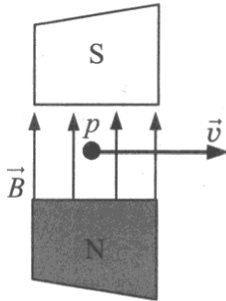
Ответ: ____

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки:

- 1) четыре пальца расположить по направлению скорости положительно заряженной частицы (для отрицательной частицы меняем направление руки на противоположное);
- 2) вектор магнитной индукции входит в ладонь;
- 3) большой палец укажет направление силы Лоренца.

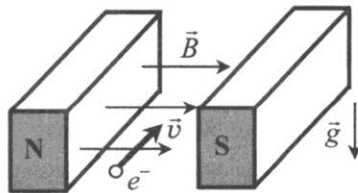
ЗАДАЧИ

29. Протон p , влетевший в зазор между полюсами электромагнита, имеет горизонтальную скорость \vec{v} , перпендикулярную вектору индукции \vec{B} магнитного поля, направленного вверх (см. рисунок). Куда направлена (*вверх, вниз, от наблюдателя, к наблюдателю*) действующая на протон сила Лоренца \vec{F} ?



Ответ: _____

30. Электрон e^- , влетевший в зазор между полюсами электромагнита, имеет горизонтально направленную скорость \vec{v} , перпендикулярную вектору индукции магнитного поля \vec{B} (см. рисунок). Куда направлена (*вверх, вниз, от наблюдателя, к наблюдателю*) действующая на электрон сила Лоренца \vec{F} ?



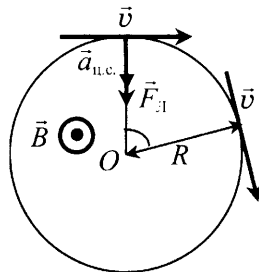
Ответ: _____

Заряженная частица в магнитном поле

В магнитном поле на движущуюся заряженную частицу действует сила Лоренца. Характер движения зависит от направления скорости частицы и вектора магнитной индукции.

1. Если скорость заряженной частицы параллельна вектору магнитной индукции ($\vec{v} \parallel \vec{B}$), то $\sin \alpha = 0$. Следовательно, сила Лоренца и ускорение равны нулю. Движение частицы равномерное и прямолинейное.

2. Если скорость заряженной частицы перпендикулярна вектору магнитной индукции ($\vec{v} \perp \vec{B}$), то сила Лоренца «закручивает» частицу, сообщает ей центростремительное ускорение. Происходит движение по окружности с постоянной по модулю скоростью.



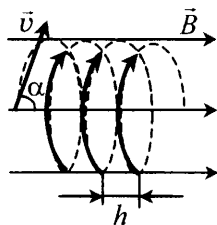
Совет: при решении задач следует во втором законе Ньютона выражать линейную скорость и центростремительное ускорение через другие кинематические величины.

	Замены величин во втором законе Ньютона: $qvB = ma_{\text{ц.с.}}$		Итоговая формула
Линейная скорость	—	$a_{\text{ц.с.}} = \frac{v^2}{R}$	$v = \frac{qBR}{m}$
Радиус окружности	—	$a_{\text{ц.с.}} = \frac{v^2}{R}$	$R = \frac{mv}{qB}$
Угловая скорость	$v = \omega R$	$a_{\text{ц.с.}} = \omega^2 R$	$\omega = \frac{qB}{m}$
Период	$v = \frac{2\pi R}{T}$	$a_{\text{ц.с.}} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$	$T = \frac{2\pi m}{qB}$
Частота	$v = 2\pi R\nu$	$a_{\text{ц.с.}} = 4\pi^2 R\nu^2$	$\nu = \frac{qB}{2\pi m}$
Импульс	—	$a_{\text{ц.с.}} = \frac{v^2}{R}$	$p = qBR$
Кинетическая энергия	—	—	$E_k = \frac{mv^2}{2}$

3. Если скорость заряженной частицы \vec{v} направлена под углом α к вектору магнитной индукции \vec{B} , то заряженная частица движется по спирали.

$$\text{Радиус спирали } R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}.$$

$$\text{Шаг спирали } h = \frac{2\pi mv \cos \alpha}{qB}.$$



ЗАДАЧИ

31. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом 2 мм. Сила, действующая на частицу со стороны магнитного поля, равна $1,6 \cdot 10^{-13}$ Н. Какова кинетическая энергия движущейся частицы?

Ответ: _____ эВ

32. Две частицы, имеющие отношение масс $m_2 / m_1 = 8$ влетели в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Найдите отношение зарядов частиц q_2 / q_1 , если их скорости равны, а отношение радиусов траекторий $R_2 / R_1 = 2$.

Ответ: _____

33. Частица, обладающая зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, движется в однородном магнитном поле индукцией B по круговой орбите радиусом $R = 3 \cdot 10^{-4}$ м. Значение импульса частицы равно $p = 2,4 \cdot 10^{-22}$ кг · м/с. Чему равна индукция B магнитного поля?

Ответ: _____ Тл

34. Две частицы, имеющие отношение зарядов $q_1 / q_2 = 1/4$ и отношение масс $m_1 / m_2 = 2$ влетели в однородное магнитное поле перпендикулярно его линиям индукции и движутся по окружностям. Определите отношение радиусов траекторий R_1 / R_2 частиц, если отношение их скоростей $v_1 / v_2 = 2$.

Ответ: _____

35. Заряженная частица массой m , несущая положительный заряд q , движется перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля \vec{B} по окружности радиусом R . Установите соответствие между физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

ФОРМУЛЫ

- А) скорость движения частицы по окружности
 Б) период обращения частицы по окружности

- 1) $\frac{qm}{RB}$
 2) $\frac{2\pi m}{qB}$
 3) $\frac{qBR}{m}$
 4) $q m B R$

Ответ:

А	Б

36. Частица массой m , несущая заряд q , движется в однородном магнитном поле с индукцией B по окружности радиуса R со скоростью v . Что произойдет с радиусом орбиты и периодом обращения частицы при увеличении индукции магнитного поля?

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

ИХ ИЗМЕНЕНИЯ

- А) радиус орбиты
 Б) период обращения

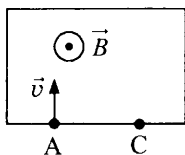
- 1) увеличится
 2) уменьшится
 3) не изменится

Ответ:

А	Б

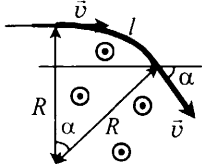
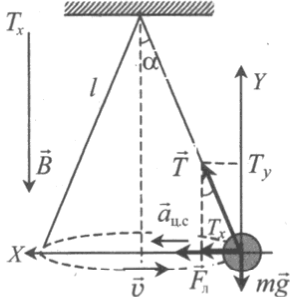
37. Пучок ионов попадает в камеру масс-спектрометра через отверстие в точке А со скоростью $v = 3 \cdot 10^4$ м/с, направленной перпендикулярно стенке АС. В камере создается однородное магнитное поле, линии вектора индукции которого перпендикулярны вектору скорости ионов. Двигаясь в этом поле, ионы попадают на мишень, расположенную в точке С на расстоянии 18 см от

точки А (см. рисунок). Чему равна индукция магнитного поля, если отношение массы иона к его заряду $m/q = 6 \cdot 10^{-7}$ кг / Кл ?



Ответ: ____ Тл

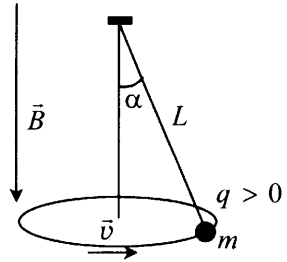
Подсказки к задачам

Задачи	Подсказки
<p>1. Заряженный шарик влетает в область магнитного поля B, имея скорость v, перпендикулярную вектору магнитной индукции. Какой путь он пройдет к тому моменту, когда вектор его скорости повернется на угол α ? Масса шарика m, заряд q.</p> <p>Ответ: $l = \frac{\pi m v}{180^\circ q B} \cdot \alpha^\circ$</p>	 <p>Учтите: движение шарика происходит по дуге окружности. Путь равен длине дуги окружности:</p> $l = \frac{\pi R}{180^\circ} \cdot \alpha^\circ$
<p>2. В однородном магнитном поле с индукцией \vec{B}, направленной вертикально вниз, равномерно вращается в горизонтальной плоскости против часовой стрелки положительно заряженный шарик массой m, подвешенный на нити длиной l. Угол отклонения нити от вертикали α, скорость движения шарика v. Найдите заряд шарика.</p> <p>Ответ: $q = \frac{m}{B} \left(\frac{v}{l \sin \alpha} - \frac{g}{v} \operatorname{tg} \alpha \right)$</p>	 <p>Второй закон Ньютона в векторной форме:</p> $\vec{T} + m\vec{g} + \vec{F}_L = m\vec{a}_{\text{у.с.}}$ <p>0X : $T \sin \alpha \pm F_{L1} = ma_{\text{у.с.}}$ 0Y : $T \cos \alpha - mg = 0$</p> <p>В данной задаче: $\vec{F}_{L1} \uparrow \uparrow 0X$, т.е.</p> $0X : T \sin \alpha + F_{L1} = ma_{\text{у.с.}}$ <p>Учтите: $R = l \sin \alpha$</p>

УПРАЖНЕНИЯ

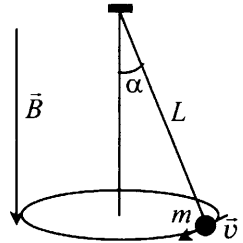
1. Электрон влетает в область магнитного поля $B = 0,01$ Тл, имея скорость $v = 1000$ км/с, перпендикулярную вектору магнитной индукции. Какой путь он пройдет к тому моменту, когда вектор его скорости повернется на 1° ? Заряд электрона $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл и его масса $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. (9,9 мкм)

2. В однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} , направленной вертикально вниз, равномерно вращается в горизонтальной плоскости против часовой стрелки шарик, имеющий положительный заряд q . Шарик подвешен на нити длиной L (конический маятник). Угол отклонения нити от вертикали α , скорость движения шарика v . Найдите массу шарика m .



$$\left(m = \frac{qB}{\frac{v}{L \sin \alpha} - \frac{g \tan \alpha}{v}} \right)$$

3. Положительно заряженный шарик массой m подвешен на нити длиной L и равномерно движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} , направленной вертикально вниз. Заряд шарика q . Нить образует с вертикалью угол $\alpha = 60^\circ$. Найдите угловую скорость равномерного обращения шарика по окружности.



$$\left(\omega = \sqrt{\left(\frac{qB}{2m} \right)^2 + \frac{2g}{L} - \frac{qB}{2m}} \right)$$

Сравнение электрического и магнитного полей

Электростатическое поле	Вихревое электрическое поле	Магнитное поле
Определение		
Среда, через которую передается электрическое взаимодействие	Среда, через которую передается электрическое взаимодействие	Среда, через которую передается магнитное взаимодействие
Где возникает?		
В пространстве вокруг неподвижного заряда	Порождается переменным магнитным полем	В пространстве вокруг движущихся зарядов
Как обнаружить?		
По действию на пробный неподвижный электрический заряд	По действию на пробный неподвижный электрический заряд	По действию на движущийся заряд или на магнитную стрелку
Общие свойства: поля материальны, непрерывно распределены в пространстве		
Силовая характеристика		
Напряженность электрического поля \vec{E}	Напряженность электрического поля \vec{E}	Вектор магнитной индукции \vec{B}
Силовые линии		
Силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных	Силовые линии замкнуты	Силовые линии замкнуты
Характер поля		
Потенциально, т.е. работа не зависит от вида траектории и по замкнутому контуру равна нулю	Вихревое, т.е. работа поля по замкнутому контуру не равна нулю	Вихревое, т.е. работа поля по замкнутому контуру не равна нулю

В природе существует единое *электромагнитное поле*.

Заряженная частица в электрическом и магнитном полях

	Электрическое поле	Магнитное поле
Сила	Электрическая сила (сила Кулона): $F_K = qE = \frac{qU}{d}$	Магнитная сила (сила Лоренца): $F_L = qvB \sin \alpha$
Ускорение и его направление	Тангенциальное ускорение: $a_E = \frac{qE}{m}, \vec{a}_E \uparrow \uparrow \vec{F}_K$	Нормальное ускорение: $a_B = \frac{qvB}{m}, \vec{a}_B \uparrow \uparrow \vec{F}_L$
Полное ускорение	$a = \sqrt{a_E^2 + a_B^2}$	

Подсказки к задачам

Задачи	Подсказки
<p>1. Электрон движется по прямой в перекрещивающихся под прямым углом электрическом поле напряженностью \vec{E} и магнитном поле с вектором магнитной индукции \vec{B}. Определите скорость электрона.</p> <p>Ответ: $v = E / B$</p>	<p>При равномерном прямолинейном движении полное ускорение равно нулю:</p> $a = 0 \Rightarrow a_E = a_B$ $\frac{qE}{m} = \frac{qvB}{m}$
<p>2. Электрон (m, q_e), ускоренный электрическим полем при разности потенциалов U, влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции \vec{B}. Определите радиус окружности, по которой будет двигаться электрон.</p> <p>Ответ: $R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q_e}}$</p>	<p><i>Закон сохранения энергии:</i></p> $q_e U = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2q_e U}{m}}$ <p><i>Второй закон Ньютона:</i></p> $F_L = ma_{\text{н.с.}}$ <p>или</p> $q_e v B = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{q_e B}$

ЗАДАЧИ

38. В первой экспериментальной установке положительно заряженная частица влетает в однородное магнитное поле так, что вектор скорости \vec{v}_0 перпендикулярен индукции магнитного поля (рис. 1). Во второй экспериментальной установке вектор скорости \vec{v}_0 той же частицы параллелен напряженности электрического поля (рис. 2).

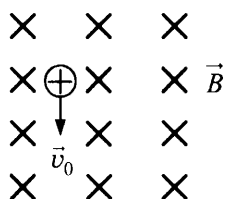


Рис. 1

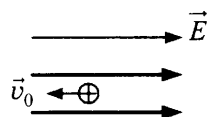


Рис. 2

По каким траекториям движутся частицы в этих установках?

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ

- А) в первой установке
Б) во второй установке

ТРАЕКТОРИЯ

- 1) прямая линия
2) окружность
3) спираль
4) парабола

Ответ:

А	Б

39. Два первоначально покоившихся электрона ускоряются в электрическом поле: первый в поле с разностью потенциалов U , второй $4U$. Ускорившиеся электроны попадают в однородное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны скорости движения электронов. Определите отношение радиусов кривизны траекторий первого и второго электронов в магнитном поле.

Ответ: _____

40. Протон ускоряется постоянным электрическим полем конденсатора, напряжение на обкладках которого 2160 В. Затем он влетает в однородное магнитное поле и движется по дуге окружности радиуса 20 см в плоскости, перпендикулярной линиям магнит-

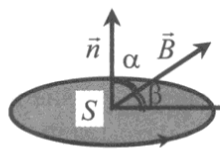
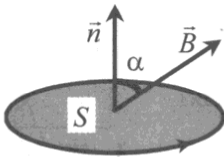
ной индукции. Каков модуль вектора индукции магнитного поля? Начальной скоростью протона в электрическом поле пренебречь. Масса протона $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, его заряд $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Ответ округлите до целых.

Ответ: ____ мТл

Магнитный поток

$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

где Φ (Вб) — магнитный поток, B (Тл) — модуль вектора магнитной индукции, S (м^2) — площадь, ограниченная контуром, α — угол между вектором \vec{B} и положительной нормалью к контуру \vec{n} . Направление положительной нормали определяется *правилом буравчика*.



Внимание. Очень часто в условии задачи дается информация о значении угла β между плоскостью контура и вектором магнитной индукции, тогда $\alpha = 90^\circ - \beta$ и

$$\Phi = BS \cos(90^\circ - \beta).$$

Магнитный поток вращающейся рамки:

$$\Phi = BS \cos(\omega t),$$

где ω — угловая скорость вращения рамки.

Магнитный поток вращающейся рамки (N витков):

$$\Phi = NSB \cos(\omega t).$$

Магнитный поток Φ и индуктивность L проводника:

$$\Phi = LI, \quad N\Phi = LI.$$

Индуктивность

Индуктивность L (Гн) характеризует способность проводника создавать магнитный поток.

Индуктивность — коэффициент пропорциональности между магнитным потоком Φ и силой тока I .

Индуктивность — мера инертности электрической цепи.

Правило Ленца

Правило Ленца: в замкнутом проводящем контуре возникает индукционный ток такого направления, что созданное им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, в результате которого этот ток возник. Таким образом, индукционное магнитное поле препятствует изменению внешнего магнитного поля.

Алгоритм решения задач на определение направления индукционного тока с помощью правила Ленца

1. Определить направление вектора магнитной индукции \vec{B} внешнего магнитного поля.

Учтите: у постоянного магнита и электромагнита вектор магнитной индукции \vec{B} выходит из северного полюса.

2. Определить, какие изменения происходят с магнитным потоком Φ .

Учтите: магнитный поток увеличивается, если:

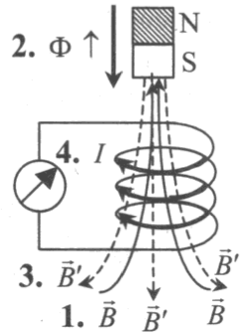
- а) магнит (или электромагнит) приближается к проводнику;
- б) вектор магнитной индукции увеличивается;
- в) площадь контура увеличивается.

3. Определить направление вектора магнитной индукции \vec{B}' магнитного поля, созданного индукционным током.

Учтите: а) при увеличении магнитного потока направление вектора магнитной индукции индукционного тока противоположно направлению вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля, т.е. если $\Phi \uparrow$, то $\vec{B}' \updownarrow \vec{B}$;

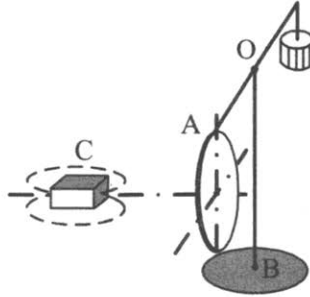
б) при уменьшении магнитного потока направление вектора магнитной индукции индукционного тока совпадает с направлением вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля, т.е. если $\Phi \downarrow$, то $\vec{B}' \upuparrows \vec{B}$.

4. Определить направление индукционного тока I , пользуясь правилом буравчика.



ЗАДАЧИ

41. Медное кольцо на горизонтальном коромысле поворачивается вокруг вертикальной оси OB под действием движущегося магнита C . Установите соответствие между направлением движения магнита, вращением коромысла с кольцом и направлением индукционного тока в кольце.



МАГНИТ

- А) Двигается по направлению к кольцу, северный полюс обращен к кольцу
 Б) Двигается к кольцу, к кольцу обращен южный полюс

ПОВОРОТ КОРОМЫСЛА И ТОК В КОЛЬЦЕ

- 1) коромысло с кольцом поворачивается, отталкиваясь от магнита, ток идет по часовой стрелке
- 2) коромысло с кольцом поворачивается, отталкиваясь от магнита, ток идет против часовой стрелки
- 3) коромысло с кольцом поворачивается, притягиваясь к магниту, ток идет по часовой стрелке
- 4) коромысло с кольцом поворачивается, притягиваясь к магниту, ток идет против часовой стрелки

Ответ:

А	Б

Закон электромагнитной индукции

ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока, взятой со знаком минус (следствие правила Ленца).

<p style="text-align: center;">Для одного витка</p> $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_0 - \Phi}{\Delta t}$ $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha = \frac{B_0 - B}{\Delta t} S \cos \alpha$ $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta S}{\Delta t} B \cos \alpha = \frac{S_0 - S}{\Delta t} B \cos \alpha$ $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \cos \alpha}{\Delta t} BS = \frac{\cos \alpha_0 - \cos \alpha}{\Delta t} BS$	<p style="text-align: center;">Для N витков</p> $\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ $\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha$ $\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta S}{\Delta t} B \cos \alpha$ $\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta \cos \alpha}{\Delta t} BS$
---	---

ЭДС индукции равна первой производной от магнитного потока по времени, взятой со знаком минус:

$\mathcal{E}_i = -\Phi'(t)$ $\mathcal{E}_i = BS\omega \sin(\omega t)$	$\mathcal{E}_i = NBS\omega \sin(\omega t)$
---	--

ЭДС индукции в движущихся проводниках:

$$\mathcal{E}_i = Bvl \sin \alpha,$$

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

ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока, взятой со знаком минус:

ЭДС индукции и индуктивность

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \frac{I_0 - I}{\Delta t}$$

Магнитный поток
и индуктивность

$$N\Phi = LI$$

$$N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Самоиндукция

При изменении силы тока в катушке происходит изменение магнитного потока, создаваемого этим током. Изменение магнитного потока, пронизывающего катушку, должно вызывать появление ЭДС индукции в катушке.

Явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой цепи называют **самоиндукцией**.

В соответствии с правилом Ленца ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию силы тока при включении и убыванию силы тока при выключении цепи. Индуктивность аналогична массе, т.е. является мерой инертности электрической цепи:

$$\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Энергия магнитного поля:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

ЗАДАЧИ

42. За 5 с магнитный поток, пронизывающий проволочную рамку, увеличился от 3 до 8 Вб. Чему равно при этом значение ЭДС индукции в рамке?

Ответ: ____ В

43. Замкнутый проводник сопротивлением $R = 3$ Ом находится в магнитном поле. В результате изменения этого поля магнитный поток, пронизывающий контур, возрос с $\Phi_1 = 0,002$ Вб до $\Phi_2 = 0,005$ Вб. Какой заряд прошел через поперечное сечение проводника?

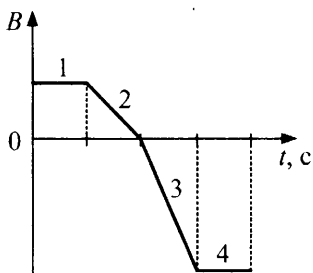
Ответ: ____ мКл

44. Круглый проволочный виток площади $S = 2$ м² расположен перпендикулярно линиям вектора магнитной индукции однородного магнитного поля. Величина вектора магнитной индукции равна 0,04 Тл. За время $t = 0,01$ с магнитное поле равномерно спадает до нуля. Чему равна ЭДС индукции, генерируемая при этом в витке?

Ответ: ____ В

45. Виток провода находится в магнитном поле, перпендикулярном плоскости витка, и своими концами замкнут на амперметр. Магнитная индукция поля меняется с течением времени согласно

графику на рисунке. Какому участку графика соответствует максимальное показание амперметра?

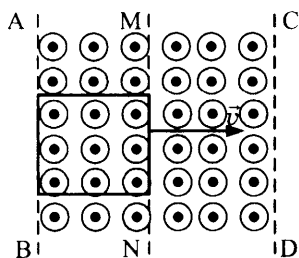


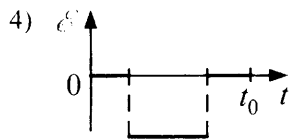
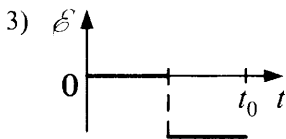
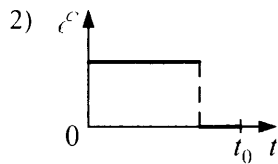
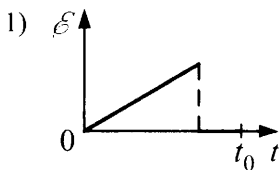
Ответ: _____

46. В опыте по исследованию ЭДС электромагнитной индукции квадратная рамка из тонкого провода со стороной квадрата b находится в однородном магнитном поле, перпендикулярном плоскости рамки. Индукция поля возрастает за время t по линейному закону от 0 до максимального значения B_{\max} . Во сколько раз увеличится ЭДС индукции, возникающая в рамке, если b увеличить в 2 раза?

Ответ: в _____ раз(а)

47. В некоторой области пространства, ограниченной плоскостями АВ и CD, создано однородное магнитное поле. Металлическая квадратная рамка движется с постоянной скоростью \vec{v} , направленной вдоль плоскости рамки и перпендикулярно его силовым линиям. На каком из графиков правильно показана зависимость от времени ЭДС индукции в рамке, если в начальный момент времени рамка начинает пересекать линию MN (см. рисунок), а в момент времени t_0 задней стороной пересекает линию CD?



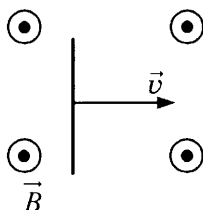


Ответ: _____

48. При скорости v_1 поступательного движения прямолинейного проводника в постоянном однородном магнитном поле на концах проводника возникает разность потенциалов U . При движении этого проводника в том же направлении в той же плоскости со скоростью v_2 разность потенциалов на концах проводника уменьшилась в 4 раза. Чему равно отношение v_1 / v_2 ?

Ответ: _____

49. Горизонтально расположенный проводник движется равноускоренно в вертикальном однородном магнитном поле, индукция которого равна 1 Тл и направлена перпендикулярно проводнику и скорости его движения (см. рисунок). При начальной скорости проводника, равной нулю, и ускорении 8 м/с^2 , проводник переместился на 1 м. ЭДС индукции на концах проводника в конце перемещения равна 6 В. Какова длина проводника?

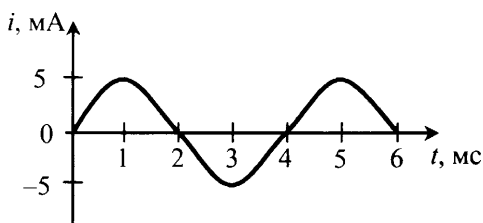


Ответ: _____ м

50. В проводнике индуктивностью 5 мГн сила тока в течение 0,2 с равномерно возрастает с 2 А до какого-то конечного значения. При этом в проводнике возбуждается ЭДС самоиндукции, равная 0,2 В. Определите конечное значение силы тока в проводнике.

Ответ: ____ А

51. На рисунке приведен график зависимости силы тока от времени в колебательном контуре, состоящем из последовательно соединенных конденсатора и катушки, индуктивность которой равна 0,2 Гн. Определите максимальное значение энергии магнитного поля катушки.



Ответ: ____ мкДж

52. Чему равна энергия магнитного поля соленоида, в котором при силе тока 10 А возникает магнитный поток 1 Вб?

Ответ: ____ Дж

53. Во сколько раз надо уменьшить индуктивность катушки, чтобы при неизменном значении силы тока в ней энергия магнитного поля катушки уменьшилась в 4 раза?

Ответ: в ____ раз(а)

54. В катушке сила тока равномерно увеличивается со скоростью 2 А/с. При этом в ней возникает ЭДС самоиндукции 20 В. Какова энергия магнитного поля катушки при силе тока в ней 5 А?

Ответ: ____ Дж

Повторение

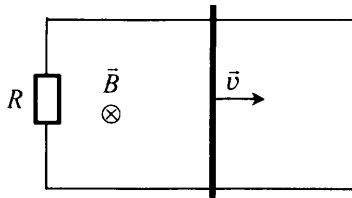
Закон Ома	$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$
Сопротивление	$R = \frac{\rho l}{S}$
Длина металлического кольца	$l = \pi D$, где D — диаметр кольца
Площадь сечения провода	$S = \frac{\pi d^2}{4}$, где d — диаметр провода

ЗАДАЧИ

55. Медное кольцо из провода диаметром 2 мм расположено в однородном магнитном поле, магнитная индукция которого меняется по модулю со скоростью 1,09 Тл/с. Плоскость кольца перпендикулярна вектору магнитной индукции. Чему равен диаметр кольца, если возникающий в нем индукционный ток равен 10 А? Удельное сопротивление меди $\rho_{\text{меди}} = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Ответ округлите до десятых.

Ответ: ____ м

56. Прямоугольный контур, образованный двумя рельсами и двумя перемычками, находится в однородном магнитном поле, перпендикулярном плоскости контура. Правая перемычка скользит по рельсам, сохраняя надежный контакт с ними. Известны величины: индукция магнитного поля $B = 0,1$ Тл, расстояние между рельсами $l = 10$ см, скорость движения перемычки $v = 2$ м/с, сопротивление контура $R = 2$ Ом. Какова сила индукционного тока в контуре?



Ответ: ____ мА