

Э. А. Вайсберг
 ~1999 год
 № V-2000

ЗАЧЕТ ПО ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ

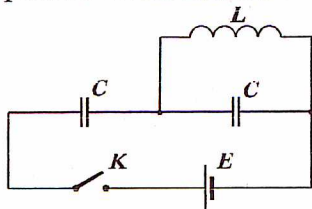
Программа зачета

Магнитное поле. Вектор магнитной индукции. Закон Био-Савара-Лапласа. Теорема о циркуляции вектора \mathbf{B} , ее применение для вычисления магнитного поля, создаваемого эл. токами. Магнитный момент, его поведение в магнитном поле. Соленоид. Сила Ампера. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в эл. и магн. полях. Магнитное поле в веществе. Парамагнетики и диамагнетики. Ферромагнетики, их доменная структура. Гистерезис.

Электромагнитная индукция. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Две физические причины явления электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле. Самоиндукция. Индуктивность. Сверхпроводники в магнитном поле.

Электромагнитное поле. Ток смещения. Уравнения Максвелла. Электромагнитная волна. Относительность электрического и магнитного полей.

Задачи, выданные школьникам заранее. Нужно проверить наличие у школьника записанных решений этих задач, после чего спросить (подробно!) решение одной из них.

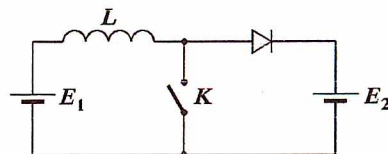


1. В схеме, изображенной на рисунке, замыкают ключ K . Найдите максимальный ток через катушку индуктивности. Внутренним сопротивлением батареи можно пренебречь.

Ответ. $I_m = E \sqrt{\frac{C}{2L}}$

Замечание для преподавателя. Хитрость задачи состоит в том, что если пренебречь и индуктивностью, и сопротивлением проводов, то задача станет некорректной. Если пренебречь сопротивлением, то сразу после замыкания ключа в цепи возникнут незатухающие колебания двух частот - высокочастотные (на индуктивности проводов) и низкочастотные (на индуктивности L). Ответ в задаче в этом случае можно получить, но он будет зависеть от индуктивности проводов. Если же сопротивлением не пренебрегать, то в зависимости от $R_{\text{п}}$ и $L_{\text{п}}$ ситуации в цепи могут быть самыми разными, но только в одном случае ответ в задаче не будет зависеть от характеристик проводов - если время затухания высокочастотных колебаний $L_{\text{п}}/R_{\text{п}}$ будет мало по сравнению с периодом колебаний на "большой" индуктивности \sqrt{LC} , а время затухания этих низкочастотных колебаний $L/R_{\text{п}}$ будет велико по сравнению с их периодом. В этом случае можно считать, что конденсаторы вначале зарядятся до напряжения $E/2$ (с выделением тепла), причем ток через катушку за это время практически не изменится (останется нулевым), а в последующих процессах тепловыделением можно пренебречь. Сильных школьников можно попросить вывести критерий справедливости такого приближения. Слабому школьнику можно просто предложить считать индуктивность проводов нулевой, однако потребовать объяснить - почему при этом их сопротивлением принципиально нельзя пренебречь.

2. В схеме, изображенной на рисунке, $E_1 = 5 \text{ В}$, $E_2 = 12 \text{ В}$, $L = 1 \text{ Гн}$. Прерыватель K периодически замыкается и размыкается на одинаковые промежутки времени $\tau = 0,01 \text{ с}$. Найдите средний ток, протекающий через батарею E_2 . Внутренним сопротивлением батарей можно пренебречь.



Ответ. $I = \frac{E_1^2 \tau}{4L(E_2 - E_1)} \approx 8,9 \text{ мА}$

Вопросы первого уровня. Как правило, не требуют обсуждения, школьники должны отвечать на них уверенно и вполне самостоятельно. Проверяется умение применять основные законы и соотношения электромагнетизма. Большинство этих вопросов разбирались на уроках. Если школьник решает эти задачи уверенно, после 2-3 вопросов переходить ко второму уровню. Если вопросы вызывают трудности, ко второму уровню не переходить!

1. Найдите величину и направление магнитной индукции на расстоянии r от прямолинейного провода с током I .

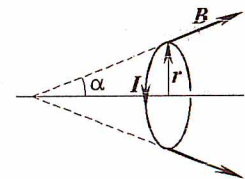
2. Найдите величину и направление вектора \mathbf{B} в точке, лежащей на оси тонкого кольца радиуса r на расстоянии x от его центра. По кольцу течет ток I .

3. Найдите распределение магнитного поля в пространстве, создаваемое следующими системами токов:

- длинный прямолинейный проводник цилиндрического сечения радиуса r (ток I равномерно распределен по сечению проводника) (поле снаружи и внутри проводника)
 - бесконечная проводящая плоскость (ток распределен по плоскости равномерно с линейной плотностью i , направление тока везде одинаково)
 - длинный цилиндрический соленоид, имеющий N витков провода (длина соленоида L , радиус сечения r , по проводу течет ток I , витки распределены равномерно)
 - тороидальная катушка, имеющая N витков провода с током I .
- Указание для преподавателя.** Разумеется, спросить надо один из пунктов.

4. Два длинных прямых провода, по которым текут одинаковые по величине токи I , расположены параллельно на расстоянии d один от другого. Найдите величину магнитной силы, действующей на единицу длины каждого провода.

5. Кольцо радиуса R , по которому течет ток I , находится в аксиально-симметричном магнитном поле. Во всех точках кольца поле равно B и образует угол α с осью кольца. Найдите величину и направление полной магнитной силы, действующей на кольцо.



6. **Сила Лоренца.** Покажите, воспользовавшись выражением для силы Ампера, что на частицу с зарядом q , движущуюся в магнитном поле B со скоростью v действует сила $F = q[vB]$.

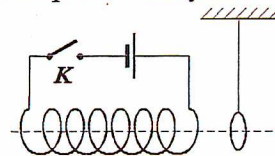
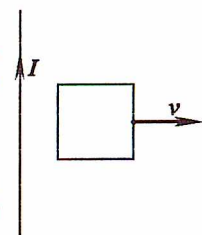
7. В однородное магнитное поле B влетает частица с зарядом q , массой m и скоростью v . Скорость частицы перпендикулярна вектору магнитной индукции. Как будет двигаться частица? Найдите циклотронный радиус и циклотронную частоту.

8. Тонкая металлическая пластина движется в однородном магнитном поле B . Скорость пластины v направлена вдоль магнитного поля. Плоскость пластины параллельна полю. Найдите плотность зарядов на поверхностях пластины.

9. Проволочное кольцо находится в магнитном поле, перпендикулярном его плоскости. Его перемещают в область пространства, где магнитное поле отсутствует. Укажите направление индукционного тока, возникающего при этом в кольце.

10. Проволочное кольцо находится в магнитном поле, перпендикулярном его плоскости. Кольцо поворачивают на 90° так, что его плоскость оказывается параллельной магнитному полю. Укажите направление индукционного тока, возникающего при этом в кольце.

11. Квадратная проводящая рамка лежит в плоскости длинного прямолинейного проводника, по которому течет ток, и удаляется от него с постоянной скоростью. Куда направлен индукционный ток, текущий в рамке?

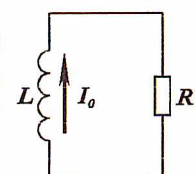


12. Проводящее кольцо подвешено на ниточке вблизи торца соленоида, подключенного к источнику напряжения через ключ K . Ключ замыкают, а через некоторое время размыкают. Куда при этом отклоняется рамка?

13. Найдите индуктивность длинного соленоида, содержащего N витков провода. Длина соленоида l , площадь поперечного сечения S .

14. Все размеры проводящего контура увеличили в k раз. Во сколько раз изменилась его индуктивность?

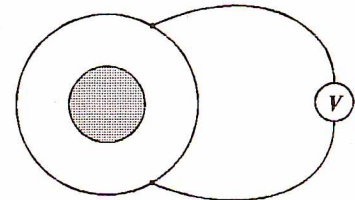
15. Катушка индуктивности L подключена к сопротивлению R . В начальный момент ток через катушку равен I_0 . Найдите зависимость тока в цепи от времени $I(t)$. Покажите (прямым вычислением), что полное количество тепла, которое выделится на сопротивлении, равно $(1/2)LI_0^2$.



16. Кольцо из сверхпроводника индуктивности L находится вблизи постоянного магнита и пронизывается магнитным потоком Φ . Тока в кольце нет. Какой ток возникнет в кольце, если магнит убрать? Каким будет магнитный поток через кольцо?

Вопросы второго уровня. Сложные, как правило, содержат парадокс. Требуют обсуждения. Не рекомендуется задавать эти вопросы "в лоб", преподавателям следует заранее продумать последовательность вводных вопросов, постепенно подводящих школьника к сути проблемы. Проверяться умение школьника думать и осмысленно обсуждать сложные физические ситуации.

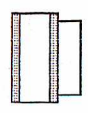
1. Проводящее кольцо охватывает длинный соленоид, оси кольца и соленоида совпадают. Магнитное поле в соленоиде меняется так, что ЭДС индукции в кольце равна 1 В . Что покажет вольтметр, подсоединенный к точкам А и В кольца, если эти точки делят окружность кольца в отношении $1:2$?



Замечание для преподавателя. Если школьник затрудняется, попросите его нарисовать эквивалентную принципиальную схему получившейся цепи, в которой ЭДС индукции, действующие на различных участках, будут изображены батарейками. В любом случае такая схема обязательно должна появиться в результате обсуждения.



2. Постоянный магнит падает из точки А до точки В, один раз - свободно, другой раз - пролетая через короткозамкнутый соленоид. В каком случае его конечная скорость будет больше?



Замечание для преподавателя. Задача допускает два решения - через действующие на магнит силы и через энергию. Какой бы подход не избрал школьник, после его ответа укажите на другой способ решения (ученик должен показать, что ответ получается такой же), а затем спросите, как изменятся рассуждения, если соленоид сверхпроводящий (в задаче по умолчанию предполагается, что он обладает сопротивлением). В результате обсуждения школьник должен четко осознать различие между сверхпроводящим соленоидом и соленоидом, обладающей большим сопротивлением - в первом случае направление тока определяется внешним магнитным потоком, во втором - его производной.

3. **Гроб Магомета.** На сверхпроводящий образец массы m , парящий над постоянным магнитом, кладут немагнитный груз такой же массы. Во сколько раз необходимо увеличить индукцию поля, создаваемого магнитом (с сохранением его конфигурации), чтобы сверхпроводник с грузом парил на прежнем расстоянии от магнита?

Замечание для преподавателя. Возможно, вначале стоит обсудить общий вопрос о поведении сверхпроводника в магнитном поле. Спросить, в чем состоит эффект Мейснера.

ЗАЧЕТ ПО ФИЗИКЕ

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК.

Программа зачета

Магнитное поле. Вектор магнитной индукции. Закон Био-Савара-Лапласа. Теорема о циркуляции вектора \mathbf{B} , ее применение для вычисления магнитного поля, создаваемого эл. токами. Магнитный момент, его поведение в магнитном поле. Соленоид. Сила Ампера. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в эл. и магн. полях. Магнитное поле в веществе. Парамагнетики и диамагнетики. Ферромагнетики, их доменная структура. Гистерезис.

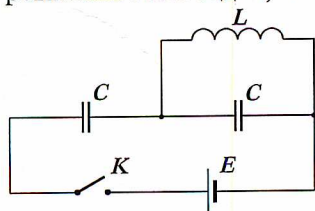
Электромагнитная индукция. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Две физические причины явления электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле. Самоиндукция. Индуктивность. Сверхпроводники в магнитном поле.

Электромагнитное поле. Ток смещения. Уравнения Максвелла. Электромагнитная волна. Относительность электрического и магнитного полей.

Переменный ток. Синусоидальное переменное напряжение. Метод комплексных амплитуд. Импеданс цепи. Сопротивление, конденсатор и индуктивность в цепи переменного тока. Трансформатор. Трехфазный ток. Генератор переменного тока. Электродвигатель.

Колебания. Механические и электрические колебания. Уравнение гармонических колебаний. Частота, период, фаза и амплитуда колебаний. Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс.

Задачи, выданные школьникам заранее. Нужно проверить наличие у школьника записанных решений этих задач, после чего спросить (подробно !) решение одной из них.

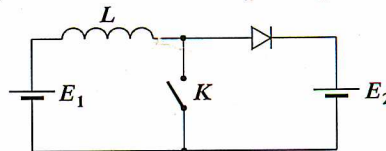


1. В схеме, изображенной на рисунке, замыкают ключ K . Найдите максимальный ток через катушку индуктивности. Внутренним сопротивлением батареи можно пренебречь.

$$\text{Ответ. } I_m = E \sqrt{\frac{C}{2L}}$$

Замечание для преподавателя. Хитрость задачи состоит в том, что если пренебречь и индуктивностью, и сопротивлением проводов, то задача станет некорректной. Если пренебречь сопротивлением, то сразу после замыкания ключа в цепи возникнут незатухающие колебания двух частот - высокочастотные (на индуктивности проводов) и низкочастотные (на индуктивности L). Ответ в задаче в этом случае можно получить, но он будет зависеть от индуктивности проводов. Если же сопротивлением не пренебрегать, то в зависимости от $R_{\text{п}}$ и $L_{\text{п}}$ ситуации в цепи могут быть самыми разными, но только в одном случае ответ в задаче не будет зависеть от характеристик проводов - если время затухания высокочастотных колебаний $L_{\text{п}}/R_{\text{п}}$ будет мало по сравнению с периодом колебаний на "большой" индуктивности \sqrt{LC} , а время затухания этих низкочастотных колебаний $L/R_{\text{п}}$ будет велико по сравнению с их периодом. В этом случае можно считать, что конденсаторы вначале зарядятся до напряжения $E/2$ (с выделением тепла), причем ток через катушку за это время практически не изменится (останется нулевым), а в последующих процессах тепловыделением можно пренебречь. Сильных школьников можно попросить вывести критерий справедливости такого приближения. Слабому школьнику можно просто предложить считать индуктивность проводов нулевой, однако потребовать объяснить - почему при этом их сопротивлением принципиально нельзя пренебречь.

2. В схеме, изображенной на рисунке, $E_1 = 5 \text{ В}$, $E_2 = 12 \text{ В}$, $L = 1 \text{ Гн}$. Прерыватель K периодически замыкается и размыкается на одинаковые промежутки времени $\tau = 0,01 \text{ с}$. Найдите средний ток, протекающий через батарею E_2 . Внутренним сопротивлением батарей можно пренебречь.



$$\text{Ответ. } I = \frac{E_1^2 \tau}{4L(E_2 - E_1)} \approx 8,9 \text{ мА}$$

Вопросы первого уровня. Как правило, не требуют обсуждения, школьники должны отвечать на них уверенно и вполне самостоятельно. Проверяется умение применять основные законы и соотношения электромагнетизма. Большинство этих вопросов разбирались на уроках. Если

школьник решает эти задачи уверенно, после 2-3 вопросов переходить ко второму уровню. Если вопросы вызывают трудности, ко второму уровню не переходить !

1. Найдите величину и направление магнитной индукции на расстоянии r от прямолинейного провода с током I .

2. Найдите величину и направление вектора \mathbf{B} в точке, лежащей на оси тонкого кольца радиуса r на расстоянии x от его центра. По кольцу течет ток I .

3. Найдите распределение магнитного поля в пространстве, создаваемое следующими системами токов:

а) длинный прямолинейный проводник цилиндрического сечения радиуса r (ток I равномерно распределен по сечению проводника) (поле снаружи и внутри проводника)

б) бесконечная проводящая плоскость (ток распределен по плоскости равномерно с линейной плотностью i , направление тока везде одинаково)

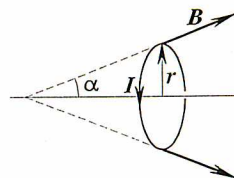
в) длинный цилиндрический соленоид, имеющий N витков провода (длина соленоида L , радиус сечения r , по проводу течет ток I , витки распределены равномерно)

г) тороидальная катушка, имеющая N витков провода с током I .

Указание для преподавателя. Разумеется, спросить надо один из пунктов.

4. Два длинных прямых провода, по которым текут одинаковые по величине токи I , расположены параллельно на расстоянии d один от другого. Найдите величину магнитной силы, действующей на единицу длины каждого провода.

5. Кольцо радиуса R , по которому течет ток I , находится в аксиально-симметричном магнитном поле. Во всех точках кольца поле равно B и образует угол α с осью кольца. Найдите величину и направление полной магнитной силы, действующей на кольцо.



6. **Сила Лоренца.** Покажите, воспользовавшись выражением для силы Ампера, что на частицу с зарядом q , движущуюся в магнитном поле \mathbf{B} со скоростью \mathbf{v} действует сила $\mathbf{F} = q[\mathbf{v}\mathbf{B}]$.

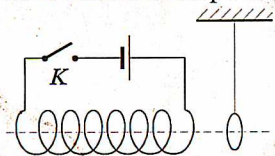
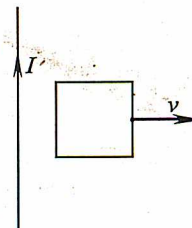
7. В однородное магнитное поле \mathbf{B} влетает частица с зарядом q , массой m и скоростью v . Скорость частицы перпендикулярна вектору магнитной индукции. Как будет двигаться частица? Найдите циклотронный радиус и циклотронную частоту.

8. Тонкая металлическая пластина движется в однородном магнитном поле \mathbf{B} . Скорость пластины v направлена вдоль магнитного поля. Плоскость пластины параллельна полю. Найдите плотность зарядов на поверхностях пластины.

9. Проволочное кольцо находится в магнитном поле, перпендикулярном его плоскости. Его перемещают в область пространства, где магнитное поле отсутствует. Укажите направление индукционного тока, возникающего при этом в кольце.

10. Проволочное кольцо находится в магнитном поле, перпендикулярном его плоскости. Кольцо поворачивают на 90° так, что его плоскость оказывается параллельной магнитному полю. Укажите направление индукционного тока, возникающего при этом в кольце.

11. Квадратная проводящая рамка лежит в плоскости длинного прямолинейного проводника, по которому течет ток, и удаляется от него с постоянной скоростью. Куда направлен индукционный ток, текущий в рамке?

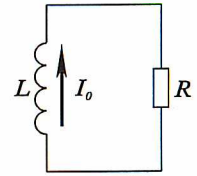


12. Проводящее кольцо подвешено на ниточке вблизи торца соленоида, подключенного к источнику напряжения через ключ K . Ключ замыкают, а через некоторое время размыкают. Куда при этом отклоняется рамка ?

13. Найдите индуктивность длинного соленоида, содержащего N витков провода. Длина соленоида l , площадь поперечного сечения S .

14. Все размеры проводящего контура увеличили в k раз. Во сколько раз изменилась его индуктивность ?

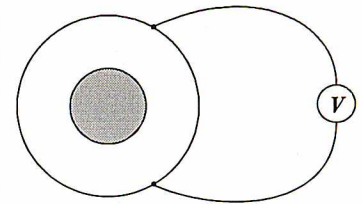
15. Катушка индуктивности L подключена к сопротивлению R . В начальный момент ток через катушку равен I_0 . Найдите зависимость тока в цепи от времени $I(t)$. Покажите (прямым вычислением), что полное количество тепла, которое выделится на сопротивлении, равно $(1/2)L I_0^2$.




16. Кольцо из сверхпроводника индуктивности L находится вблизи постоянного магнита и пронизывается магнитным потоком Φ . Тока в кольце нет. Какой ток возникнет в кольце, если магнит убрать ? Каким будет магнитный поток через кольцо ?

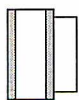
Вопросы второго уровня. Сложные, как правило, содержат парадокс. Требуют обсуждения. Не рекомендуется задавать эти вопросы “в лоб”, преподавателям следует заранее продумать последовательность вводных вопросов, постепенно подводящих школьника к сути проблемы. Проверяется умение школьника думать и осмысленно обсуждать сложные физические ситуации.


1. Проводящее кольцо охватывает длинный соленоид, оси кольца и соленоида совпадают. Магнитное поле в соленоиде меняется так, что ЭДС индукции в кольце равна 1 В. Что покажет вольтметр, подсоединенный к точкам А и В кольца, если эти точки делят окружность кольца в отношении 1:2 ?



Замечание для преподавателя. Если школьник затрудняется, попросите его нарисовать эквивалентную принципиальную схему получившейся цепи, в которой ЭДС индукции, действующие на различных участках, будут изображены батарейками. В любом случае такая схема обязательно должна появиться в результате обсуждения.

 2. Постоянный магнит падает из точки А до точки В, один раз - свободно, другой раз - пролетая через короткозамкнутый соленоид. В каком случае его конечная скорость будет больше ?



 **Замечание для преподавателя.** Задача допускает два решения - через действующие на магнит силы и через энергию. Какой бы подход не избрал школьник, после его ответа укажите на другой способ решения (ученик должен показать, что ответ получается такой же), а затем спросите, как изменятся рассуждения, если соленоид сверхпроводящий (в задаче по умолчанию предполагается, что он обладает сопротивлением). В результате обсуждения школьник должен четко осознать различие между сверхпроводящим соленоидом и соленоидом, обладающей большим сопротивлением - в первом случае направление тока определяется внешним магнитным потоком, во втором - его производной.

3. **Гроб Магомета.** На сверхпроводящий образец массы m , парящий над постоянным магнитом, кладут немагнитный груз такой же массы. Во сколько раз необходимо увеличить индукцию поля, создаваемого магнитом (с сохранением его конфигурации), чтобы сверхпроводник с грузом парил на прежнем расстоянии от магнита ?

Замечание для преподавателя. Возможно, вначале стоит обсудить общий вопрос о поведении сверхпроводника в магнитном поле. Спросить, в чем состоит эффект Мейснера.