

$CU^2/2$, И НЕ ТОЛЬКО!

- Билетик предъявите!
- Да Вы, что! Я же проводник!
- Да хоть конденсатор, закон есть закон...

– Извините, на анекдот отвлекся.

Выставляю на демонстрационный стол коробочку на подставке. В ней – тот самый конденсатор.

- Знаете, что это такое?
- Проходили, – слышен неуверенный ответ.
- Мимо, – уточняет кто-то.

– Тогда, помогите собрать с пола красные и синие шарики да закинуть их в корзину, укрепленную под потолком...

– Это мы можем...

– Корзина обладает ограниченной ёмкостью, больше чем положено не поместится, – отправляю в полёт последний шарик и картинно вытираю обратной стороной ладони со лба несуществующий пот.

– Чтобы её заполнить, нам пришлось совершить работу. А как иначе? «Вдруг откуда ни возмись, ниоткуда не взялось» – это об изменении энергии путём совершения работы. Конденсатор – та же «корзина», но хранят в нём не шарики, а электрические заряды: положительные и отрицательные. Вместимость конденсатора характеризуется электроёмкостью (C), у нашего – 3300мкФ . При заданном напряжении, накапливается лишь ограниченный заряд¹. Ёмкость конденсатора наполняется ими долго, а разряжается быстро, – в подтверждение своих слов, я тяну за верёвочку, и корзина под потолком переворачивается. Шарики (хорошо, что не электрические заряды) сыплются вниз, запасённая энергия высвобождается.

Присутствующие обращают внимание на укрепленный на коробочке электрический патрон с лампой накаливания (L : 60Вт , 220В). Через неё-то и предстоит заряжаться конденсатору (см. схему соединения): перестала гореть лампа – «корзина» наполнена².

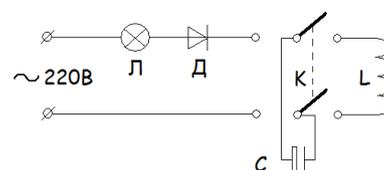
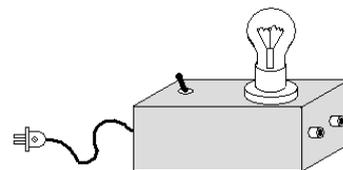
Для зарядки конденсатора необходим источник постоянного напряжения. А у нас в наличии лишь сетевая розетка с напряжением переменным. Без помощи выпрямительного диода³ (D) не обойтись. (Ещё раз взгляните на схему).

– Знаете, что он делает?..

Одна девушка на экзамене так ответила на подобный вопрос: «Разгибает синусоиду, из которой состоит ток, в прямую линию». А когда комиссия на секунду застыла с открытыми ртами, быстро поправилась: «А потом сгибает его обратно».

– Замечу, опустив подробности, что диод позволяет нашему конденсатору зарядиться до напряжения 311В .⁴

Помните, что наша история про « $CU^2/2$ » (и не только). Но сколько это в джоулях? Оценка начальной энергии заряженного конденсатора даёт значение $W \approx 160\text{Дж}$.⁵



¹ $Q = CU$.

² Время зарядки зависит от сопротивления лампы и ёмкости конденсатора, а рассчитывается по формуле: $\tau \approx 5R_{\text{лампы}}C$. В нашем случае оно примерно равно $\tau \approx 13,3\text{с}$.

³ Используется Д 226.

⁴ $U = 220\text{В} \times \sqrt{2} = 311\text{В}$.

⁵ $W = CU^2/2 = 3300 \times 10^{-6} \text{Ф} \times (311 \text{В})^2 / 2 \approx 160\text{Дж}$.

– Много это или мало?
 – Энергия – это способность к совершению работы, – напоминает знающий товарищ.

Ему-то и вручается пудовая гиря для подъёма с пола на высоту одного метра.

– Осторожно, на ногу не урони! – весьма понятное сравнение.

А можно, например, перевести имеющуюся энергию в тротиловый эквивалент (ради красного словца) – 38мг!⁶ В любом случае – энергетическое содержимое нашей коробочки есть константа и, согласно закону сохранения и превращения энергии, способна лишь переходить из одного вида в другой.

Предлагаю всем присутствующим проверить свою научную интуицию, но вначале произвожу необходимую подготовку.

С помощью длинных гибких проводников⁷ соединяю клеммы коробочки с пятисантиметровым колечком – катушкой (L) из двадцати витков тонкого медного провода. Кладу на стол рядом с конденсатором небольшой медный диск (диаметром с блюдце и толщиной в карандаш), и только на него – катушку.

(– Теперь нашей мебели тротиловый эквивалент не страшен).

– Внимание, вопрос! На что пойдёт $CU^2/2$ (160Дж), если щёлкнуть переключателем (K) и замкнуть заряженный конденсатор катушкой малого сопротивления?

В дополнение – варианты ответов, каждый из которых – тема для диспута:

а) катушка расплавится (*см. закон Джоуля-Ленца*);

б) примёрзнет (*как альтернатива предыдущему варианту*);

в) увеличит свою потенциальную энергию;

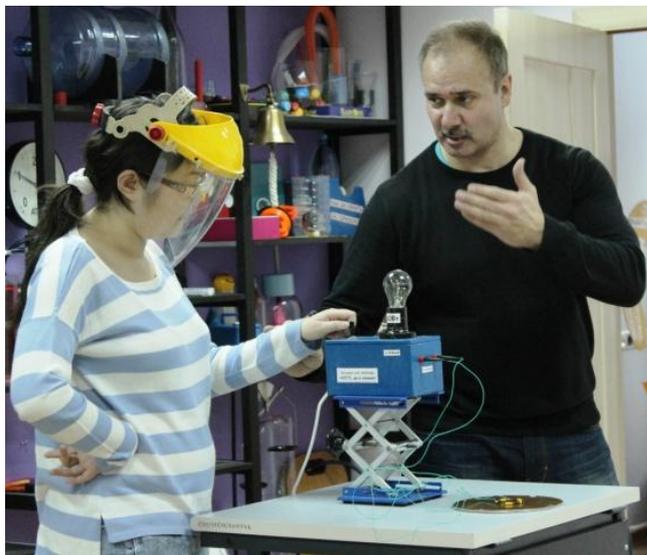
г) катушка развернётся в направлении «север-юг» (*т.к. превратится в электромагнит, на который будет действовать магнитное поле Земли*);

д) загудит, как трансформатор;

е) завяжется «морским» узлом (*намёк на действие сил Ампера*);

ж) медный диск позеленеет (*т.к. при нагреве возрастёт скорость химических реакций*);

з) диск намагнитится.



– Слышал сам, как на экзамене по электротехнике на вопрос преподавателя «Почему электроны в электрической цепи устремляются от «минуса» к «плюсу», студент, немного подумав, ответил «По проводам!» Кто бы спорил. Путь наименьшего сопротивления – самый верный. Миллиарды электронов не могут ошибаться! Наш случай – не исключение: в катушке непременно возникнет кратковременный ток, конденсатор разрядится, его энергия – «исчезнет». Вот только какие будут последствия?

Школьникам известны три действия тока: тепловое, магнитное и химическое.

Есть о чём поспорить! А мне того и надо.

Когда потенциал разумных аргументов растрачивается, настаёт время эксперимента, с которым не поспоришь. Правом проверки награждается участник диспута, высказавший наиболее интересную гипотезу.

⁶ Тротиловый эквивалент – 1000кал/г.

⁷ Тонкие и лёгкие.

Интрига сохраняется до конца – я выдаю помощнику защитную маску, а сам предпочитаю наблюдать происходящее издали.

– Переключатель в положение «Заряд»! – даю команду.

– Есть «Заряд»! – загорается лампа.

Когда же она гаснет, все понимают – 160Дж энергии «наши»!

– Ключ – в нейтральное положение!

– Есть, ключ в нейтральное положение!

– Барабанная дробь! – захлопали присутствующие ладошками по бёдрам, застучали подошвами о пол.

– «Разряд»! – наступает момент истины.

Щелчок переключателя высвобождает $CU^2/2$, катушка неожиданно подпрыгивает вверх, увлекая за собой соединительные провода. Осилив метровую высоту и растратив энергию, она обессилена шлёпается вниз.

– Что это было?

– ВИДИМО, энергия электрического поля пошла на изменение потенциальной энергии катушки.

Звучат аплодисменты тем, кто оказался «прав»!..

– Интересно, каков коэффициент полезного действия (КПД) нашего устройства? – принимаю предположения, а затем предлагаю произвести его оценку.

Сначала мы определяем полезную работу (по подъёму катушки массой 16г на высоту одного метра). Она равна 0,16Дж.⁸ Затем, находим отношение полезной работы к затраченной (полной). КПД⁹ нашей установки оказывается очень маленьким – 0,1%! Если бы он был 100%-ным и вся энергия перешла в потенциальную, то катушка подлетела бы на ОДИН КИЛОМЕТР! Но, видно, не судьба.

– Куда же делось 99,9% энергии (почти 160Дж)?..

– Выходит, рано аплодировали. Все на поиски «потерянной» энергии! Но сначала уясним причину подпрыгивания...

В 1831 году английский учёный Майкл Фарадей открыл явление, названное электромагнитной индукцией. При всяком изменении магнитного поля вблизи проводника, в нём возникает электродвижущая сила.

– Знаешь, что такое ЭДС? – спросил я однажды у ученика.

– Конечно! – ответил он, – это отношение работы потусторонних сил по перемещению заряда...

– Каких, каких?

– Потусторонних.

(И анекдот, и смысл явления доступен знатокам определения).

В нашем случае переменное магнитное поле создаётся катушкой, через которую идёт ток, разряжающий конденсатор. А она лежит на медном диске (хорошем проводнике), поэтому в нём возникает та самая ЭДС, создающая токи, называемые индукционными. Всякий ток, в свою очередь, порождает вокруг себя своё магнитное поле. Таким образом, на время разряда конденсатора диск превращается в электромагнит. Подпрыгивание – результат взаимного отталкивания¹⁰ электромагнитов: катушки и диска.

Неочевидный ответ (отсутствующий среди предложенных вариантов) – вся энергия электрического поля ($CU^2/2$) превращается во внутреннюю энергию – тепло! Не «теряется», а переходит в другую форму и перераспределяется между телами¹¹, находящимися в переменном магнитном поле. Что-то и нам с вами достаётся.

Эксперимент повторяется. На этот раз его участник прижимает после подпрыгивания катушку к своему лбу и делится ощущениями: – Горячая.

⁸ $A_n = mgh$, где масса катушки с проводами (m) равна 16г, а высота подлёта (h) примерно 1м.

⁹ $KPD = (A_n / A_z) \times 100\%$

¹⁰ См. правило Ленца.

¹¹ Проводники нагреваются из-за токов, диэлектрики – за счёт поляризации.

(Нагрев диска заметить не удаётся – большая теплоёмкость).

– Друзья, возник интересный вопрос, – «выкатываю я рояль из кустов», – изменится ли КПД подскока, если медный диск предварительно охладить?

На столе появляется сосуд с жидким азотом. Продолжение интригует и увлекает!

15.11.17