Уважаемые студенты!

- Ознакомтесь с предложенным материал;
- Напишите ***краткий*** конспект;
- Ответьте на вопросы в конце лекции.
- Подготовить на дополнительную оценку сообщение: Техника безопасности в обращении с электрическим током.
- По вопросам обращаться 072-1098278 или hvastov@rambler.ru
- Фотоотчёт конспекта прислать в течение 3 дней со дня получения задания на hvastov@rambler.ru

Тема: Правило Ленца. Самоиндукция. Индуктивность. Принцип действия электрогенератора. Переменный ток. Трансформатор. Производство, передача и потребление электроэнергии. Проблемы энергосбережения.

Цель: Изучить новый материал, Обобщить ранее изученный материал.

План

1. Правило Ленца.
2. Самоиндукция. Индуктивность.
3. Принцип действия электрогенератора. Переменный ток.
4. Производство, передача и потребление электроэнергии. Проблемы энергосбережения.

На прошлом уроке мы изучили явление электромагнитной индукции. Оно заключается в том, что при изменении магнитного потока, пронизывающего поверхность, которая ограничивается замкнутым токопроводящим контуром, в этом контуре возникает электрический ток. Также мы установили, что физический смысл скорости изменения магнитного потока – это электродвижущая сила индукции. При этом для расчета ЭДС электромагнитной индукции мы пользовались формулой:

$$\varepsilon_i = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|$$

В этой формуле стоит модуль, так как неизвестно направление индукционного тока. Именно вопросу нахождения направления индукционного тока посвящен этот урок.

Правило Ленца. Опыт, демонстрирующий правило Ленца

Направление индукционного тока в контуре определяется правилом Ленца. Это правило устанавливается при помощи следующего опыта. Имеется два алюминиевых кольца, соединенных алюминиевой перекладиной. Одно из этих колец имеет разрез (не замкнутое), второе кольцо сплошное. Перекладина установлена на острие иглы, которая закреплена на подставке. Приближаем магнит к кольцу, имеющему разрез, – видно, что с системой ничего не происходит. При приближении магнита к замкнутому концу, система начинает поворачиваться (кольцо отталкивается от полюса магнита) (см. рис. 1). Если же надеть кольцо на магнит и затем вытягивать магнит из него, то кольцо тянется за магнитом.

Рис. 1. Опыт Ленца

Приближением или удалением магнита от сплошного кольца мы меняем магнитный поток, который пронизывает площадь кольца. Согласно теории явления электромагнитной индукции, в кольце должен возникнуть индукционный электрический ток. Из опытов Ампера известно, что там, где проходит ток, возникает магнитное поле. Следовательно, замкнутое кольцо начинает вести себя как магнит. То есть происходит взаимодействие двух магнитов (постоянный магнит, который мы двигаем, и замкнутый контур с током).

Так как система не реагировала на приближение магнита к кольцу с разрезом, то можно сделать вывод, что индукционный ток в незамкнутом контуре не возникает.

Причины отталкивания или притягивания кольца к магниту

1. При приближении магнита

При приближении полюса магнита кольцо отталкивается от него. То есть оно ведет себя как магнит, у которого с нашей стороны такой же полюс, как у приближающегося магнита. Если мы приближаем северный полюс магнита, то вектор магнитной индукции кольца с индукционным током направлен в противоположную сторону относительно вектора магнитной индукции северного полюса магнита (см. рис. 2).

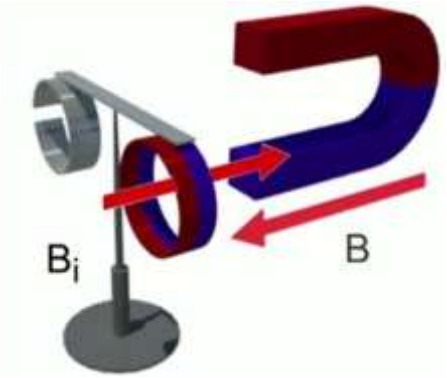

Рис. 2. Приближение магнита к кольцу

2. При удалении магнита от кольца

При удалении магнита кольцо тянется за ним. Следовательно, со стороны удаляющегося магнита у кольца образовывается противоположный полюс. Вектор магнитной индукции кольца с током направлен в ту же сторону, что и вектор магнитной индукции удаляющегося магнита (см. рис. 3).

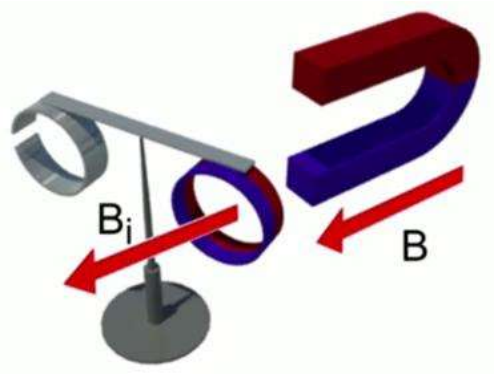

Рис. 3. Удаление магнита от кольца

Из данного опыта можно сделать вывод, что при движении магнита кольцо ведет себя также подобно магниту, полярность которого зависит от того, увеличивается или уменьшается магнитный поток, пронизывающий площадь кольца. Если поток возрастает, то векторы магнитной индукции кольца и магнита противоположны по направлению. Если магнитный поток сквозь кольцо уменьшается со временем, то вектор индукции магнитного поля кольца совпадает по направлению с вектором индукции магнита.

Направление индукционного тока в кольце можно определить по правилу правой руки. Если направить большой палец правой руки по направлению вектора магнитной индукции, то четыре согнутых пальца укажут направление тока в кольце (см. рис. 4).

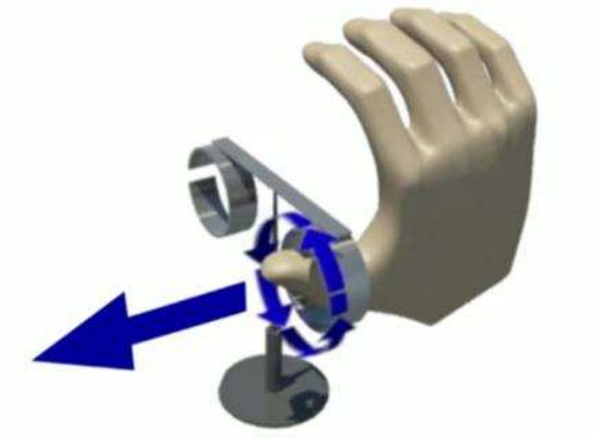

Рис. 4. Правило правой руки

Закон электромагнитной индукции

При изменении магнитного потока, пронизывающего контур, в контуре возникает индукционный ток такого направления, чтобы своим магнитным потоком компенсировать изменение внешнего магнитного потока.

Закон электромагнитной индукции

Если внешний магнитный поток возрастает, то индукционный ток своим магнитным полем стремится замедлить это возрастание. Если магнитный поток убывает, то индукционный ток своим магнитным полем стремится замедлить это убывание.

Эта особенность электромагнитной индукции выражается знаком «минус» в формуле ЭДС индукции.

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Закон электромагнитной индукции

При изменении внешнего магнитного потока, пронизывающего контур, в контуре возникает индукционный ток. При этом значение электродвижущей силы численно равно скорости изменения магнитного потока, взятой со знаком «-».

Правило Ленца является следствием закона сохранения энергии в электромагнитных явлениях.

Мы установили закон электромагнитной индукции:

При изменении магнитного потока, пронизывающего плоскость контура, в этом контуре возникает электродвижущая сила, численно равная скорости изменения магнитного потока, взятого со знаком минус:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Знак минус отражает тот факт, что индукционный поток направлен таким образом, чтобы своим магнитным полем препятствовать изменению магнитного потока, вызывающего этот ток.

Основы электродинамики были заложены Ампером в 1820 году. Работы Ампера вдохновили многих инженеров на конструирование различных технических устройств, таких как электродвигатель (конструктор Б.С. Якоби), телеграф (С. Морзе), электромагнит, конструированием которого занимался известный американский ученый Генри.

Джозеф Генри прославился благодаря созданию серии уникальных мощнейших электромагнитов с подъемной силой от 30 до 1500 кг при собственной массе магнита 10 кг. Создавая различные электромагниты, в 1832 году ученый открыл новое явление в электромагнетизме – явление самоиндукции. Именно этому явлению посвящен данный урок.

Рис. 5. Джозеф Генри

Явление самоиндукции

Генри изобретал плоские катушки из полосовой меди, с помощью которых добивался силовых эффектов, выраженных более ярко, чем при использовании проволочных соленоидов. Ученый заметил, что при нахождении в цепи мощной катушки ток в этой цепи достигает своего максимального значения гораздо медленнее, чем без катушки.

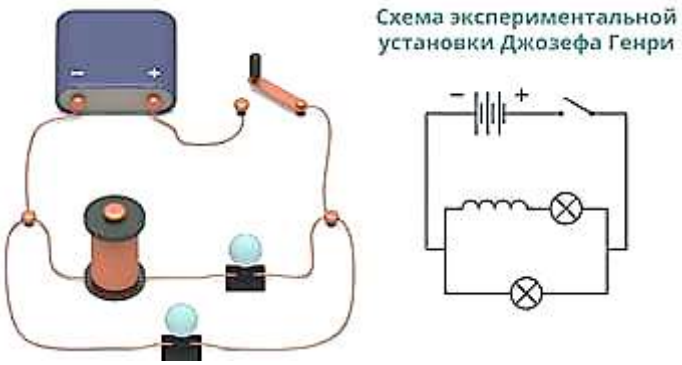

Рис. 6. Схема экспериментальной установки Д. Генри

На рис. 6 изображена электрическая схема экспериментальной установки, на основе которой можно продемонстрировать явление самоиндукции. Электрическая цепь состоит из двух параллельно соединенных лампочек, подключенных через ключ к источнику постоянного тока. Последовательно с одной из лампочек подключена катушка. После замыкания цепи видно, что лампочка, которая соединена последовательно с катушкой, загорается медленнее, чем вторая лампочка (рис. 7).

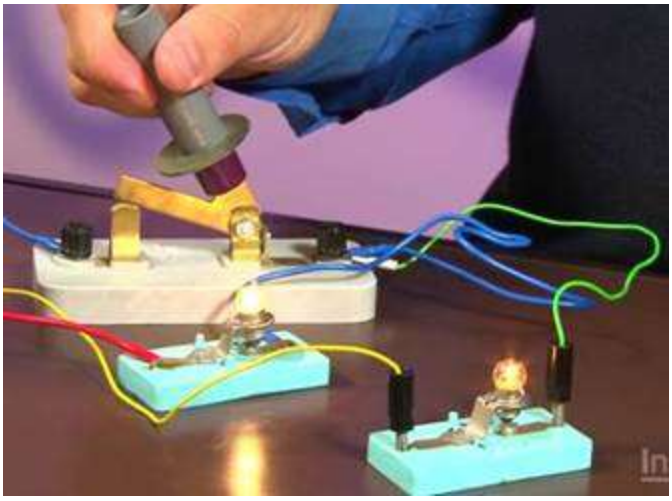

Рис. 7. Различный накал лампочек в момент включения цепи

При отключении источника лампочка, подключенная последовательно с катушкой, гаснет медленнее, чем вторая лампочка.

Почему лампочки гаснут не одновременно

При замыкании ключа (рис. 8) из-за возникновения ЭДС самоиндукции ток в лампочке с катушкой нарастает медленнее, поэтому эта лампочка загорается медленнее.

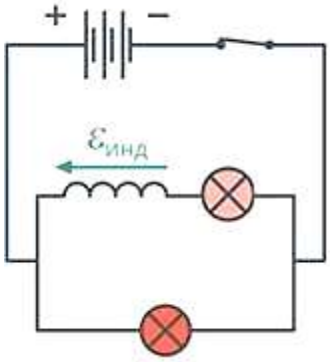

Рис. 8. Замыкание ключа

При размыкании ключа (рис. 9) возникающая ЭДС самоиндукции мешает убыванию тока. Поэтому ток еще некоторое время продолжает течь. Для существования тока нужен замкнутый контур. Такой контур в цепи есть, он содержит обе лампочки. Поэтому при размыкании цепи лампочки должны некоторое время светиться одинаково, и наблюдаемое запаздывание может быть вызвано другими причинами.

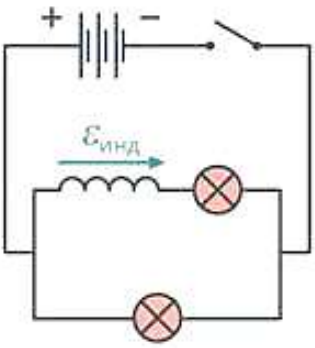

Рис. 9. Размыкание ключа

Рассмотрим процессы, происходящие в данной цепи при замыкании и размыкании ключа.

1. Замыкание ключа.

В цепи находится токопроводящий виток. Пусть ток в этом витке течет против часовой стрелки. Тогда магнитное поле будет направлено вверх (рис. 10).

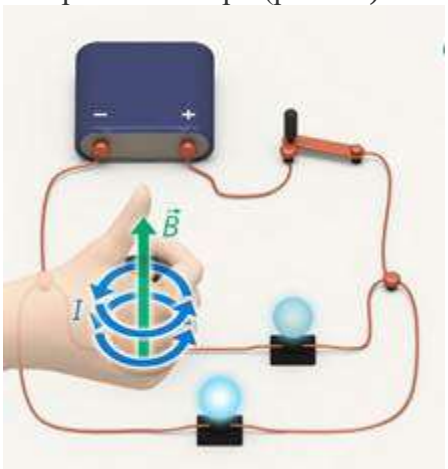

Рис. 10. Направление тока и магнитного поля в витке

Таким образом, виток оказывается в пространстве собственного магнитного поля. При возрастании тока виток окажется в пространстве изменяющегося магнитного поля собственного тока. Если ток возрастает, то созданный этим током магнитный поток также возрастает. Как известно, при возрастании магнитного потока, пронизывающего плоскость контура, в этом контуре возникает электродвижущая сила индукции и, как следствие, индукционный ток. По правилу Ленца, этот ток будет направлен таким образом, чтобы своим магнитным полем препятствовать изменению магнитного потока, пронизывающего плоскость контура.

То есть для рассматриваемого на рис. 10 витка индукционный ток должен быть направлен по часовой стрелке (рис. 11), тем самым препятствуя нарастанию собственного тока витка. Следовательно, при замыкании ключа ток в цепи возрастает не мгновенно благодаря тому, что в этой цепи возникает тормозящий индукционный ток, направленный в противоположную сторону.

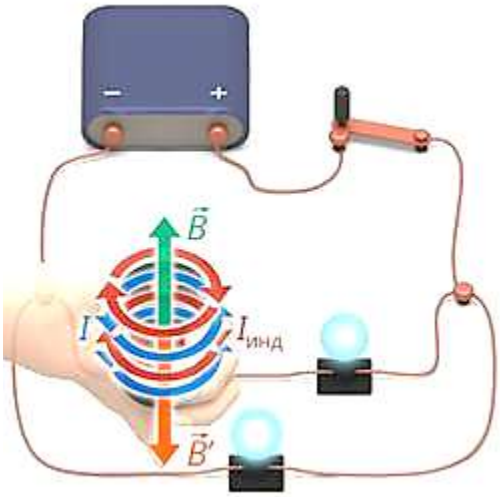

Рис. 11. Направление индукционного тока

2. Размыкание ключа

При размыкании ключа ток в цепи уменьшается, что приводит к уменьшению магнитного потока сквозь плоскость витка. Уменьшение магнитного потока приводит к появлению ЭДС индукции и индукционного тока. В этом случае индукционный ток направлен в ту же сторону, что и собственный ток витка. Это приводит к замедлению убывания собственного тока.

Вывод: при изменении тока в проводнике возникает электромагнитная индукция в этом же проводнике, что порождает индукционный ток, направленный таким образом, чтобы препятствовать любому изменению собственного тока в проводнике (рис. 12). В этом заключается суть явления самоиндукции. Самоиндукция – это частный случай электромагнитной индукции.

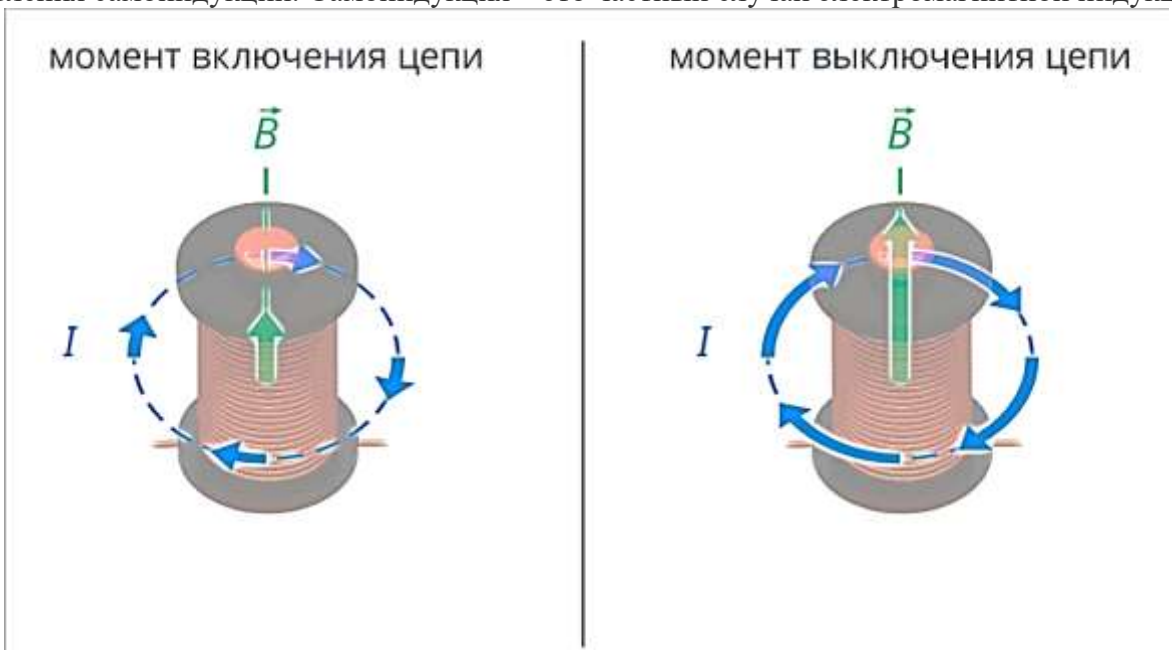

Рис. 12. Момент включения и выключения цепи

Формулы для нахождения потока магнитной индукции и ЭДС самоиндукции

Формула для нахождения магнитной индукции прямого проводника с током:

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

где B – магнитная индукция; μ_0 – магнитная постоянная; I – сила тока; r – расстояние от проводника до точки.

Поток магнитной индукции через площадку равен:

$$\Phi = B \cdot S$$

где S – площадь поверхности, которая пронизывается магнитным потоком.

Таким образом, поток магнитной индукции пропорционален величине тока в проводнике.

Для катушки, в которой N – число витков, а l – длина, индукция магнитного поля определяется следующим соотношением:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{l}$$

Магнитный поток, созданный катушкой с числом витков N, равен:

$$\Phi = B \cdot S \cdot N$$

Подставив в данное выражение формулу индукции магнитного поля, получаем:

$$\Phi = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot I \cdot S}{l}$$

Отношение числа витков к длине катушки обозначим числом n:

$$n = \frac{N}{l}$$

Получаем окончательное выражение для магнитного потока:

$$\Phi = \mu_0 \cdot n^2 \cdot I \cdot S \cdot l$$

Из полученного соотношения видно, что значение потока зависит от величины тока и от геометрии катушки (радиус, длина, число витков). Величина, равная $\mu_0 \cdot n^2 \cdot S \cdot l$, называется индуктивностью:

$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot S \cdot l$

Единицей измерения индуктивности является генри:

$[L] = \text{Гн (Генри)}$

Следовательно, поток магнитной индукции, вызванный током в катушке, равен:

$\Phi = I \cdot L$

С учетом формулы для ЭДС индукции $\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, получаем, что ЭДС самоиндукции равна произведению скорости изменения тока на индуктивность, взятому со знаком «–»:

$$\varepsilon = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Основные выводы

Самоиндукция – это явление возникновения электромагнитной индукции в проводнике при изменении силы тока, протекающего сквозь этот проводник.

Электродвижущая сила самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения тока, протекающего сквозь проводник, взятой со знаком минус. Коэффициент пропорциональности называется **индуктивностью**, которая зависит от геометрических параметров проводника.

$$\varepsilon = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Проводник имеет индуктивность, равную 1 Гн, если при скорости изменения тока в проводнике, равной 1 А в секунду, в этом проводнике возникает электродвижущая сила самоиндукции, равная 1 В.

С явлением самоиндукции человек сталкивается ежедневно. Каждый раз, включая или выключая свет, мы тем самым замыкаем или размыкаем цепь, при этом возбуждая индукционные токи. Иногда эти токи могут достигать таких больших величин, что внутри выключателя проскакивает искра, которую мы можем увидеть.

Начиная изучать тему «Электромагнитная индукция», мы отметили, что это явление лежит в основе всей современной цивилизации. Даже личный комфорт каждого человека напрямую связан с этим явлением. На данном уроке, тема которого: «Генерация электрического тока», мы узнаем, как создается электроэнергия, которая поступает в каждый дом, каждую квартиру.

Генератор электрического тока

В основе явления электромагнитной индукции лежит возникновение индукционного тока в контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур. Таким образом, если создать систему, в которой магнитный поток, пронизывающий контур, меняется постоянным образом, то такая система генерировала бы электрический ток непрерывно. При этом совершенно неважно, происходит ли движение магнита относительно контура или движение контура относительно магнита.

Машина, в которой магнитный поток, пронизывающий контур, меняется непрерывно периодическим образом, при этом генерируя электрический ток, называется генератором электрического тока.

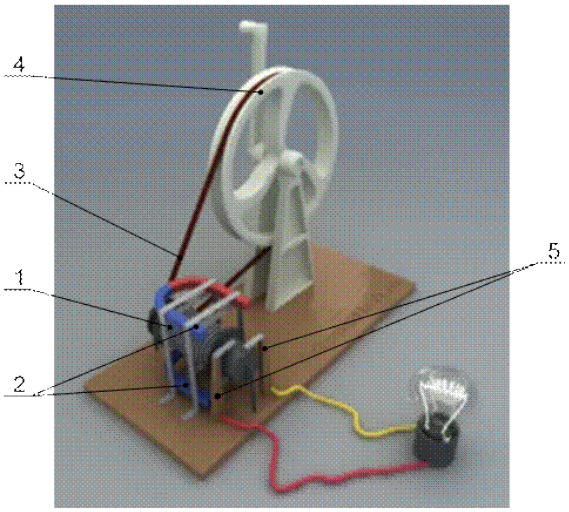

Рис. 13. Генератор электрического тока

На рисунке 13 представлена модель генератора переменного тока. В этой модели две токопроводящие катушки (1) закреплены на валу и могут вращаться между полюсами магнитов (2). Вал соединен с помощью ременной передачи (3) с колесом (4), которое приводится во вращение вручную. Другой конец вала имеет скользящие контакты (5) (контакты с выводами катушки). На скользящих контактах возникает электрическое напряжение, приблизительно равное ЭДС индукции. Вращающаяся часть генератора называется ротор, неподвижная – статор.

Рис. 14. Гидроэлектростанция

Рис. 15. Теплоэлектростанция

Виды электростанций

По принципу представленной модели работают все генераторы переменного тока, в частности и самые мощные, которые называются электростанциями. В зависимости от способа, которым приводится во вращение ротор электростанции, они подразделяются на разные типы. На гидроэлектростанциях (см. рис. 14) вращение ротора происходит за счет энергии падающей воды; на теплоэлектростанциях (см. рис. 15) – за счет работы водяного пара, получаемого при сжигании топлива; на атомных электростанциях (см. рис. 16) – также за счет работы водяного пара, который получается из-за выделения атомной энергии.

Рис. 16. Атомная электростанция

Одним из первых конструкторов гидроэлектростанции был английский промышленник и инженер Джозеф Свон. Он владел поместьем, по территории которого протекала река. На берегу реки англичанин установил водяное колесо, которое приводило во вращение катушку, расположенную между двумя большими магнитами. К катушке Свон присоединил провода и впервые в истории человечества осветил собственный дом электрическим светом.

Известно, что при протекании электрического тока в проводнике выделяется тепло (по закону Джоуля – Ленца), следовательно, происходят потери энергии. Если учесть, что между электростанцией и потребителем протягивают линии электропередач на очень большие расстояния, то в этих проводах должны происходить очень большие потери энергии.

Способы повышения эффективности электростанции и понижения потерь энергии обсудим на следующих уроках, посвященных электромагнитной индукции.

мы выяснили, как производится переменный электрический ток. Основным элементом генератора является катушка индуктивности, которая вращается в магнитном поле. Приводить катушку в движение можно любым способом (при помощи паровой машины, двигателя внутреннего сгорания или за счет потоков падающей воды). Далее возникает задача передачи энергии конечному пользователю. Как правило, конечные пользователи находятся далеко от электростанций. Таким образом, энергию необходимо передавать на большие расстояния. Для этого существуют линии электропередач. Однако если длина проводов большая, то и сопротивление будет высоким. В свою очередь это приведет к большим потерям передаваемой мощности. На данном уроке мы рассмотрим, от чего зависят потери мощности и как их можно уменьшить.

Схема электропередачи

В общем случае **схему электропередачи** (рис. 17) можно представить в виде простой замкнутой цепи. Источник ЭДС (ε) обладает внутренним сопротивлением r_0. Всех потребителей тока можно представить как общую нагрузку сопротивлением R. Соединительные провода линий передач обладают электрическим сопротивлением r.

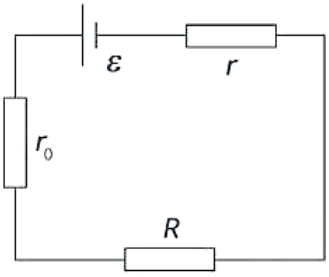

Рис. 17. Схема электропередачи

Согласование сопротивлений

Значение тока в цепи будет определяться законом Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r + r_0}$$

Обычно внутренним сопротивлением источника можно пренебречь, поскольку оно намного меньше сопротивлений проводов и нагрузки:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Так, ЭДС источника можно определить по соотношению:

$$\varepsilon = I \cdot R + I \cdot r$$

Умножим полученное выражение на величину тока:

$$\varepsilon \cdot I = I^2 \cdot R + I^2 \cdot r$$

Каждое из слагаемых в полученном выражении имеет определенный смысл. Так, в левой части равенства стоит **мощность сторонних сил** или **мощность источника**. Первое слагаемое в правой части равенства представляет собой мощность, передаваемую потребителям, – **полезную мощность**. Второе слагаемое – **потеря мощности**.

При передаче электроэнергии важно максимально увеличить полезную мощность, сведя к минимуму при этом потери. Попытаемся этого достичь. Зависимость полезной мощности от сопротивления нагрузки R (рис. 18) имеет вид:

$$P_H(R) = I^2 \cdot R = \frac{\varepsilon^2 \cdot R}{(R + r)^2}$$

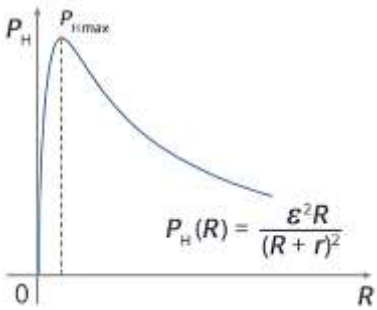

Рис. 2. График зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки

Можно показать, что полезная мощность как функция сопротивления нагрузки будет иметь максимум при условии равенства сопротивления нагрузки и сопротивления подводящих проводов – **согласование сопротивлений**.

Если сопротивление источника сопоставимо с сопротивлением проводов, то условие максимума полезной мощности будет представлять собой равенство сопротивления нагрузки и суммы сопротивлений проводов и источника. Таким образом, потребителю доставляется максимальная мощность, если сопротивление нагрузки равно сумме сопротивлений подводящих проводов и источника.

Причины потерь мощности

Рассмотрим причины, от которых зависят потери мощности. При заданной мощности источника ток в цепи будет равен отношению мощности источника к ЭДС:

$$I = \frac{P}{\varepsilon}$$

Если внутренним сопротивлением источника пренебречь, то напряжение на полюсах источника будет равно ЭДС источника:

$$U \approx \varepsilon, (r_0 \ll R)$$

Тогда мощность потерь в проводах будет пропорциональна квадрату мощности источника и обратно пропорциональна квадрату напряжения на источнике.

$$P_п = I^2 \cdot r = \frac{P^2 \cdot r}{U^2}$$

Из этого выражения видим, что для уменьшения мощности потерь необходимо либо уменьшать сопротивление подводящих проводов, либо увеличивать напряжение на электростанции.

Экономические расчеты потерь мощности

Рассмотрим, почему так важно уменьшать потери. Крупный город потребляет мощность порядка $P_н \approx 50$ МВт. Из-за потерь мощности станция должна вырабатывать существенно больше, чем 50 МВт. Сопротивление 1 км проводов линий электропередач равно примерно 1 Ом.

При передаче электроэнергии при напряжении 220 В потери мощности в проводах составят около $5 \cdot 10^7$ кВт/км.

Мощность на нагрузке равна: $P_н = I \cdot U$.

Ток через нагрузку равен: $I = \frac{P_н}{U}$.

Ток в проводниках будет такой же, как и ток через нагрузку, поэтому мощность потерь в проводах будет иметь вид:

$$P_п = I \cdot U = I \cdot I \cdot r = \left(\frac{P_н}{U}\right)^2 \cdot r$$

$$P_п(U = 220\ \text{В}, L = 1\ \text{км}) = \frac{(50\,000\,000)^2 \cdot 1}{220^2} = \frac{2500 \cdot 10^{10}}{48\,400} \approx 5 \cdot 10^{10}\ \text{Вт} \approx 5 \cdot 10^7\ \text{кВт}$$

При передаче на 1000 км потери мощности составят за один час 10^{10} кВт·ч. При стоимости $2{,}5$ руб./кВт·ч потери мощности составят $25\,000\,000\,000$ руб·ч.

Чтобы избежать таких колоссальных потерь, целесообразно существенно повысить предаваемое напряжение. Например, если повысить передаваемое напряжение с 220 до 400 кВ, то указанные потери уменьшатся в 4 млн раз. Поэтому передача электроэнергии на расстояние требует повышения напряжения до 400 или 500 кВ, а затем его снижения до потребительского уровня 220 В. Однако сконструировать электростанции, вырабатывающие сразу высокое напряжение, затруднительно. Электростанции вырабатывают, как правило, невысокое напряжение порядка 20 кВ. Поэтому сначала необходимо повысить напряжение до 400 кВ, а затем снизить до 220 В. Подобные модификации представляют собой технически крайне сложную задачу при использовании постоянного тока. В случае же переменного тока эта задача решается гораздо проще. Именно этим объясняется то, что все электростанции и линии передач работают на переменном токе.

Домашнее задание

1. Как формулируется закон электромагнитной индукции?
2. Почему в формуле для закона электромагнитной индукции стоит знак «-»?
3. Индуктивность какого проводника равна 1 Генри?
4. На каком принципе основана работа генераторов переменного тока?
5. Назовите основные типы электростанций. Приведите примеры электростанций различных типов.
6. С какой целью в генераторе электрического тока используют скользящие контакты?
7. Почему при передаче электроэнергии на большие расстояния прежде всего уделяют внимание повышению напряжения, а не уменьшению сопротивления проводов?
8. Потребителю передается полезная мощность 200 кВт. Сопротивление линии электропередачи – 5 Ом, напряжение на шинах станции – 2000 В. На сколько изменится КПД электропередачи, если напряжение на шинах электростанции увеличить в 2,5 раза, а передаваемую потребителю мощность оставить прежней?