

Электроэнергия

Темы кодификатора ЕГЭ: производство, передача и потребление электрической энергии.

Электрическая энергия играет в нашей жизни исключительную роль. Если в доме нет света, мы оказываемся практически беспомощны. Функционирование предприятий, средств транспорта, коммуникаций и прочих достижений цивилизации основано на использовании электроэнергии.

Электроэнергия обладает замечательными свойствами, которые и обеспечивают возможность её повсеместного применения.

- *Простота производства.* В мире функционирует огромное множество разнообразных генераторов электроэнергии.
- *Передача на большие расстояния.* Электроэнергия транспортируется по высоковольтным линиям электропередачи без существенных потерь.
- *Преобразование в другие виды энергии.* Электроэнергия легко преобразуется в механическую энергию (электродвигатели), внутреннюю энергию (нагревательные приборы), энергию света (осветительные приборы) и т. д.
- *Распределение между потребителями.* Специальные устройства позволяют распределять электроэнергию между потребителями с самыми разными «запросами» — промышленными предприятиями, городскими электросетями, жилыми домами и т. д.

Рассмотрим подробнее вопросы производства, передачи и потребления электрической энергии.

Производство электроэнергии

Среди генераторов электроэнергии наиболее распространены *электромеханические генераторы переменного тока*. Они преобразуют механическую энергию вращения ротора в энергию индукционного переменного тока, возникающего благодаря явлению электромагнитной индукции.

На рис. 1 проиллюстрирована основная идея генератора переменного тока: проводящая рамка (называемая *якорем*) вращается в магнитном поле.

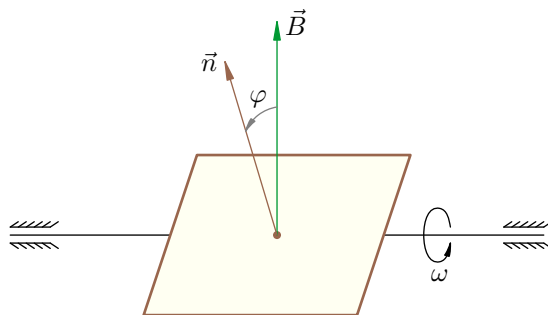


Рис. 1. Схема генератора переменного тока

Магнитный поток сквозь рамку меняется со временем и порождает ЭДС индукции, которая приводит к возникновению индукционного тока в рамке. С помощью специальных приспособлений (колец и щёток) переменный ток передаётся из рамки во внешнюю цепь.

Если рамка вращается в однородном магнитном поле B с постоянной угловой скоростью ω , то возникающий переменный ток будет синусоидальным. Покажем это.

Выберем направление вектора нормали \vec{n} к плоскости рамки. Вектор \vec{n} , таким образом, вращается вместе с рамкой. Направление обхода рамки считается положительным, если с конца вектора \vec{n} этот обход видится против часовой стрелки.

Напомним, что ток считается положительным, если он течёт в положительном направлении (и отрицательным в противном случае). ЭДС индукции считается положительной, если она создаёт ток в положительном направлении (и отрицательной в противном случае).

Предположим, что в начальный момент времени векторы \vec{n} и \vec{B} сонаправлены. За время t рамка повернётся на угол $\varphi = \omega t$. Магнитный поток через рамку в момент времени t равен:

$$\Phi = BS \cos \varphi = BS \cos \omega t, \quad (1)$$

где S — площадь рамки. Дифференцируя по времени, находим ЭДС индукции:

$$e = -\dot{\Phi} = BS\omega \sin \omega t. \quad (2)$$

Если сопротивление рамки равно R , то в ней возникает ток:

$$i = \frac{e}{R} = \frac{BS\omega}{R} \sin \omega t. \quad (3)$$

Как видим, ток действительно меняется по гармоническому закону, то есть является синусоидальным.

В реальных генераторах переменного тока рамка содержит не один виток, как в нашей схеме, а большое число N витков. Это позволяет увеличить в N раз ЭДС индукции в рамке. Почему?

Объяснить это несложно. В самом деле, магнитный поток через каждый виток площади S по-прежнему определяется выражением (1), так что ЭДС индукции в одном витке согласно формуле (2) равна: $e_1 = BS\omega \sin \omega t$. Все эти ЭДС индукции, возникающие в каждом витке, складываются друг с другом, и суммарная ЭДС в рамке окажется равной:

$$e = Ne_1 = NBS\omega \sin \omega t.$$

Сила тока в рамке:

$$i = \frac{NBS\omega}{R} \sin \omega t,$$

где R есть по-прежнему сопротивление рамки.

Кроме того, рамку снабжают железным (или стальным) сердечником. Железо многократно усиливает магнитное поле внутри себя, и поэтому наличие сердечника позволяет увеличить магнитный поток сквозь рамку в сотни и даже тысячи раз. Как следует из формул (2) и (3), ЭДС индукции и ток в рамке увеличатся во столько же раз.

Передача электроэнергии

Электроэнергия производится в основном на тепловых электростанциях (ТЭС), гидроэлектростанциях (ГЭС) и атомных электростанциях (АЭС).

Ротаторы генераторов ТЭС вращаются за счёт энергии сгорающего топлива (чаще всего этим топливом является уголь). Экономически целесообразным является строительство ТЭС вблизи крупных угольных месторождений.

Роторы генераторов ГЭС приводятся во вращение энергией падающей воды. Поэтому ГЭС строятся на реках.

В любом случае возникает проблема передачи выработанной электроэнергии потребителям, находящимся за много километров от электростанций.

Электроэнергия транспортируется по проводам. Потери энергии на нагревание проводов должны быть сведены к минимуму. Оказывается, для этого нужно *высокое напряжение* в линии электропередачи. Покажем это.

Рассмотрим двухпроводную линию электропередачи, связывающую источник переменного напряжения u с потребителем Π (рис. 2).

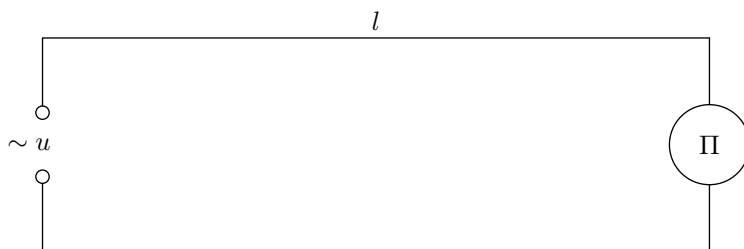


Рис. 2. Передача электроэнергии по двухпроводной линии

Длина линии равна l , так что общая длина проводов составит $2l$. Если ρ — удельное сопротивление материала провода, S — площадь поперечного сечения провода, то сопротивление линии будет равно:

$$R = \frac{2\rho l}{S}. \quad (4)$$

Потребителю должна быть передана мощность с заданным действующим значением P . Обозначим через U и I действующие значения напряжения в линии и силы тока. Если α — сдвиг фаз между током и напряжением, то, как мы знаем из предыдущего листка, $P = UI \cos \alpha$. Отсюда

$$I = \frac{P}{U \cos \alpha}. \quad (5)$$

Часть мощности ΔP теряется на нагревание проводов:

$$\Delta P = I^2 R.$$

Подставляя сюда выражения (4) и (5), получим:

$$\Delta P = \frac{2\rho l P^2}{S U^2 \cos^2 \alpha}. \quad (6)$$

Мы видим из формулы (6), что потеря мощности обратно пропорциональна квадрату напряжения в линии. Следовательно, для уменьшения потерь надо повышать напряжение при передаче. Вот почему линии электропередач являются *высоковольтными*. Например, Волжская ГЭС передаёт в Москву электроэнергию при напряжении 500 киловольт.

Трансформатор

Генераторы электростанций имеют ЭДС порядка 10–20 кВ. Как мы только что видели, для передачи электроэнергии на большие расстояния нужно повышать напряжение до нескольких сотен киловольт.

С другой стороны, напряжение бытовой электросети составляет 220 В. Поэтому при доставке энергии обычному потребителю требуется понижение напряжения до сотен вольт.

Замечательно, что повышение и понижение напряжения в случае синусоидального переменного тока не представляет никаких сложностей. Для этого используются специальные устройства — *трансформаторы*.

Простейшая схема трансформатора приведена на рис. 3. На замкнутом стальном сердечнике расположены две обмотки.

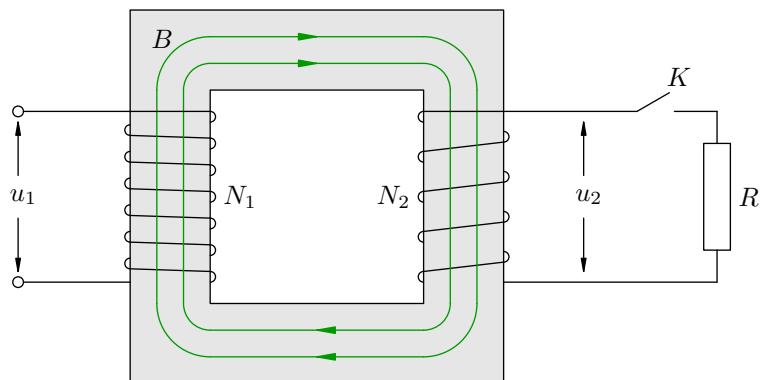


Рис. 3. Трансформатор

Первичная обмотка содержит N_1 витков; на неё подаётся входное напряжение u_1 . Это напряжение как раз и требуется преобразовать — повысить или понизить.

Вторичная обмотка содержит N_2 витков. К ней подсоединяется *нагрузка*, условно обозначенная резистором R . Это — потребитель, для работы которого нужно преобразованное напряжение u_2 .

Режим холостого хода

Наиболее прост для рассмотрения *холостой ход* трансформатора, когда нагрузка отключена (ключ K разомкнут).

Пусть напряжение на первичной обмотке меняется по закону косинуса с амплитудой U_{01} :

$$u_1 = U_{01} \cos \omega t.$$

Активное сопротивление R_1 первичной обмотки считаем очень малым по сравнению с её индуктивным сопротивлением. В таком случае, как мы знаем, сила тока i_1 в первичной обмотке отстаёт по фазе от напряжения на $\pi/2$:

$$i_1 = I_{01} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_{01} \sin \omega t.$$

При этом трансформатор не потребляет энергию из сети, к которой он подключён.

Магнитный поток Φ , пронизывающий витки первичной обмотки, пропорционален току i_1 и поэтому также меняется по закону синуса:

$$\Phi = \Phi_0 \sin \omega t.$$

В каждом витке первичной обмотки возникает ЭДС индукции:

$$e = -\dot{\Phi} = -\omega \Phi_0 \cos \omega t. \tag{7}$$

Следовательно, полная ЭДС индукции в первичной обмотке равна:

$$e_1 = N_1 e = -N_1 \omega \Phi_0 \cos \omega t. \tag{8}$$

Стальной сердечник практически не выпускает магнитное поле наружу — линии магнитного поля почти целиком идут внутри сердечника. Магнитный поток в любом сечении сердечника одинаков; в частности, каждый виток вторичной обмотки пронизывает тот же самый магнитный поток Φ . Поэтому в одном витке вторичной обмотки возникает та же ЭДС индукции e , даваемая выражением (7), а полная ЭДС индукции во вторичной обмотке равна:

$$e_2 = N_2 e = -N_2 \omega \Phi_0 \cos \omega t. \quad (9)$$

Как видим, обе ЭДС индукции в первичной и вторичной обмотках меняются синфазно. Мгновенные значения ЭДС индукции относятся друг к другу как числа витков в обмотках:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (10)$$

Ввиду малости активного сопротивления первичной обмотки мы можем считать, что выполнено приближённое равенство:

$$u_1 + e_1 \approx 0 \quad (11)$$

(вспомните рассуждение из листка «Переменный ток. 1», раздел «Катушка в цепи переменного тока»). Так как цепь вторичной обмотки разомкнута и ток в ней отсутствует, имеем точное равенство:

$$u_2 + e_2 = 0.$$

Итак, $u_1 \approx -e_1$, $u_2 = -e_2$. Следовательно, мгновенные значения напряжений в первичной и вторичной обмотках также меняются почти синфазно. С учётом равенства (10) получаем:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (12)$$

Величина $k = N_1/N_2$ называется *коэффициентом трансформации*. Отношение мгновенных значений напряжений в (12) можно заменить отношением действующих значений U_1 и U_2 :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Если $k > 1$, то трансформатор является *понижающим*. В этом случае вторичная обмотка содержит меньше витков, чем первичная; потребитель получает меньшее напряжение, чем то, что поступает на вход трансформатора. На рис. 3 изображён как раз понижающий трансформатор.

Если же $k < 1$, то трансформатор будет *повышающим*. Вторичная обмотка содержит больше витков, чем первичная, и потребитель получает напряжение более высокое, чем на входе трансформатора.

Режим нагрузки

Теперь рассмотрим вкратце работу *нагруженного* трансформатора, когда ключ K на рис. 3 замкнут. В этом случае трансформатор выполняет свою прямую задачу — передаёт энергию потребителю, подключённому ко вторичной обмотке.

Согласно закону сохранения энергии, передача энергии потребителю возможна только за счёт увеличения потребления энергии из внешней сети. Так оно в действительности и происходит. Давайте попробуем понять, какие физические процессы приводят к этому.

Главное заключается в том, что ввиду малого омического сопротивления первичной обмотки сохраняется приближённое равенство (11), т. е.

$$e_1 \approx -u_1.$$

Напряжение u_1 задаётся внешней сетью, поэтому амплитуда ЭДС индукции e_1 остаётся прежней — равной амплитуде внешнего напряжения.

Но, с другой стороны, из выражения (8) мы знаем, что амплитуда величины e_1 равна $N_1\omega\Phi_0$. Стало быть, при подключении нагрузки остаётся неизменной амплитуда Φ_0 магнитного потока Φ , пронизывающего витки первичной и вторичной обмоток.

При холостом ходе магнитный поток Φ порождался магнитным полем тока i_1 первичной обмотки (во вторичной обмотке тока не было). Теперь в создании магнитного потока участвуют два магнитных поля: поле B_1 тока i_1 первичной обмотки (оно создаёт поток Φ_1) и поле B_2 тока i_2 вторичной обмотки (оно создаёт поток Φ_2). Таким образом,

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2.$$

В отличие от тока i_1 , который «навязывается» первичной обмотке внешней сетью, ток i_2 — индукционный, и его направление определяется правилом Ленца: магнитное поле B_2 стремится уменьшить изменение суммарного магнитного потока Φ . Но амплитуда Φ_0 этого потока, как мы уже говорили, остаётся той же, что и при холостом ходе. Как же так?

Очень просто — чтобы обеспечить неизменность величины Φ_0 , приходится увеличиваться магнитному потоку Φ_1 . Возрастает амплитуда тока i_1 первичной обмотки! Вот почему увеличивается потребление энергии из сети по сравнению с режимом холостого хода.

Первичная обмотка потребляет из сети мощность

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \alpha_1$$

(как и выше, в данной формуле фигурируют действующие значения мощности, напряжения и силы тока).

Нагрузка получает от вторичной обмотки мощность

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \alpha_2.$$

Эта мощность является *полезной* с точки зрения потребителя. Отношение полезной мощности, получаемой нагрузкой, к мощности, потребляемой из сети — это *КПД трансформатора*:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \alpha_2}{U_1 I_1 \cos \alpha_1}.$$

Разумеется, $P_2 < P_1$ — часть мощности теряется в трансформаторе. Потери мощности состоят из двух частей.

1. Так называемые «потери в меди», обозначаемые $\Delta P_{\text{мед}}$. Это мощность, расходуемая на нагревание первичной и вторичной обмоток:

$$\Delta P_{\text{мед}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

Сколь бы малыми не были активные сопротивления R_1 и R_2 этих обмоток, они не равны нулю, и при больших токах с ними приходится считаться.

2. Так называемые «потери в стали», обозначаемые $\Delta P_{\text{ст}}$. Сюда относятся:

- Мощность, расходуемая на перемагничивание сердечника, т. е. на изменение ориентации элементарных токов под действием внешнего магнитного поля.
- Мощность, расходуемая на нагревание сердечника индукционными вихревыми токами (которые называются ещё *токами Фуко*). Эти токи возникают в сердечнике под действием вихревого электрического поля, порождаемого переменным магнитным полем. Для уменьшения токов Фуко сердечники собираются из листов специальной трансформаторной стали, но полностью ликвидировать эти токи, конечно же, не удаётся.

Оказывается, потери в стали не зависят от нагрузки — они определяются только амплитудой магнитного потока, которая, как мы знаем, при любой нагрузке остаётся неизменной.

Таким образом, имеем:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{\text{мед}} + \Delta P_{\text{ст}},$$

и для КПД трансформатора получаем следующее выражение:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{мед}} + \Delta P_{\text{ст}}}. \quad (13)$$

Если полезная мощность P_2 мала (*недогрузка* трансформатора), то и КПД мал. Действительно, числитель в (13) маленький, а знаменатель — не меньше постоянной величины потерь в стали $\Delta P_{\text{ст}}$.

Если полезная мощность P_2 чрезмерно велика (*перегрузка* трансформатора), то КПД опять-таки мал. Дело в том, что в этом случае велики токи I_1 и I_2 в обмотках трансформатора, и, следовательно, большой величины достигают потери в меди $\Delta P_{\text{мед}}$.

Для трансформатора существует оптимальная (так называемая *номинальная*) нагрузка, на которую он рассчитан. При номинальной нагрузке оказывается, что КПД трансформатора близок к единице, т. е.

$$P_2 \approx P_1,$$

или, с учётом выражений для мощностей:

$$U_2 I_2 \cos \alpha_2 \approx U_1 I_1 \cos \alpha_1.$$

Кроме того, сдвиги фаз приближённо равны нулю, так что

$$U_2 I_2 \approx U_1 I_1.$$

Следовательно, при нагрузках, близких к номинальной, имеем:

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx k,$$

где k — введённый выше коэффициент трансформации. Например, у понижающего трансформатора $k > 1$, и при номинальной нагрузке ток в его вторичной обмотке в k раз больше тока первичной обмотки.