

Лекция № 17

Электродинамика Некоторые практические применения

Фарадей открыл, что величина ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения потока вектора магнитной индукции Φ_B , пронизывающего рамку:

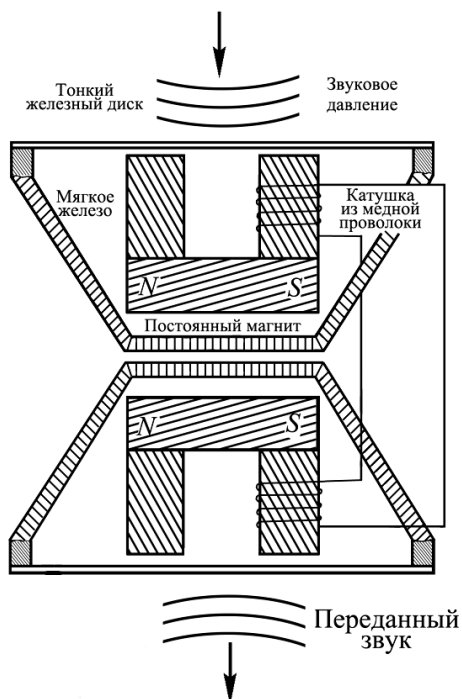
$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Знак «минус» в этой формуле говорит о том, что ЭДС индукции порождает в замкнутой цепи индукционный ток, направленный таким образом, чтобы препятствовать изменению магнитного потока в замкнутом контуре.

Это правило, определяющее знак в формуле для ЭДС индукции и направление индукционного тока, было установлено в 1833 г. петербургским академиком Ленцем и называется правилом Ленца.

Явление электромагнитной индукции лежит и в основе принципа работы **телефона** – аппарата, передающего речь на расстоянии.

Первоначально телефон состоял из двух одинаковых «слухофонов», соединенных длинными проводами. Принцип устройства состоит в том, что звуковые колебания воздуха передаются металлической мембране, замыкающей полюса магнитов, на которых намотана катушка с проволокой. Движение мембраны под действием волн изменяет величину магнитного поля в сердечнике. В результате в катушке, намотанной на сердечник, возникает ЭДС.



Если концы катушки присоединить ко второму точно такому же «слухофону», то в нем электрический ток, являющийся электрическим изображением звука первого слухофона, будет изменять силу притяжения мембраны к магниту.

Она начнет совершать колебания и породит звуковые волны, подобные тем, что заставляли колебаться первую мембрану. Так, человеческий голос был впервые передан Беллом по проводам.

Устройство телефона Белла приведено на рис.

В настоящее время в качестве источника звука в телефонах применяется устройство, подобное описанному. В качестве приемника звука – микрофона используется угольный микрофон,

изменяющий сопротивление угольного порошка в месте контакта с угольной

мембраной под действием звукового давления, что приводит к изменению тока в цепи, питаемой от внешних батарей.

Генератор переменного тока.

Пусть в постоянном и однородном магнитном поле $\mathbf{B}$ вращается проволочная катушка, подключенная к внешней цепи с помощью скользящих контактов. Возможно также, что вращается постоянный магнит между неподвижными катушками. При вращении рамки магнитный поток через катушку непрерывно изменяется

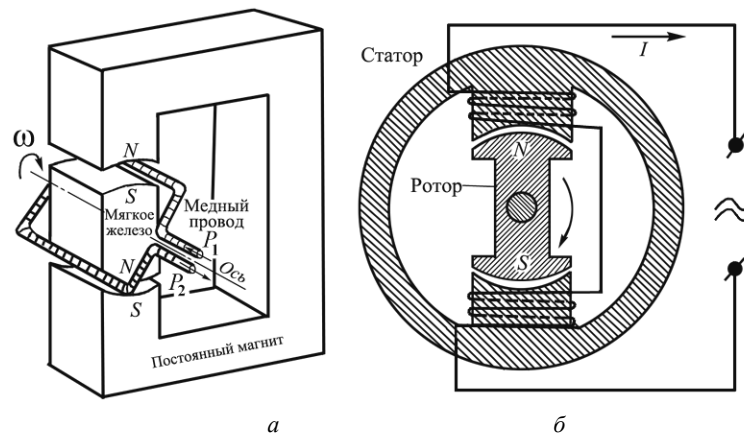
$$\Phi = NBS \cos \alpha t.$$

Здесь αt – угол между нормалью к катушке и направлением вектора магнитной индукции $\mathbf{B}$; ω – угловая скорость вращения катушки; t – время; N – число витков в катушке; S – площадь витка в катушке.

Наводимая ЭДС индукции равна

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt} = NBS\omega \sin \alpha t.$$

Разность потенциалов на проводах, подведенных к нагрузке, изменяется периодически по величине и знаку. Такая меняющаяся разность потенциалов называется *переменным напряжением*, а устройство, с помощью которого оно получается, – *генератором переменного тока*.



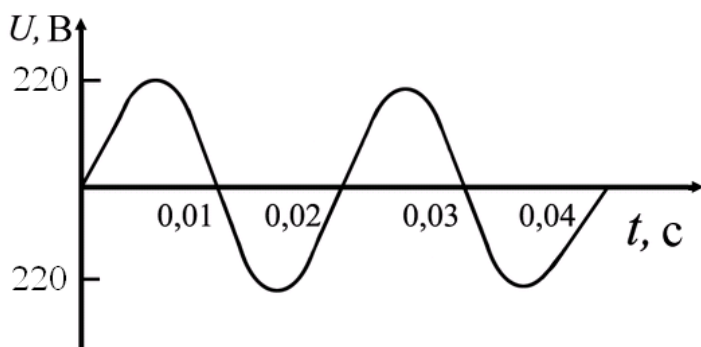
Генератор переменного тока: *a* – рамка, вращающаяся в постоянном магнитном поле; *б* – постоянный магнит, вращающийся между катушками.

Рассмотрим катушку размером $S = a \times b$ см² с $N = 200$ витками, вращающуюся с частотой $\nu = 50$ об/с в магнитном поле $B = 0,5$ Тл, $a = 7$ см, $b = 10$ см.

Для катушки из N витков ЭДС равна

$$U = N\mathcal{E} = NBS\omega \sin \alpha t = 2\pi NBS\nu \sin 2\pi \nu t = U_m \sin \alpha t = 220 \sin \alpha t, [\text{В}].$$

На рис. приведен график напряжения от времени.



Переменное напряжение частотой 50 Гц и амплитудой $U_m = 220$ В, создаваемое рассмотренным генератором. Действующее значение такого напряжения $U = U_m / \sqrt{2} = 157$ В.

В России используется переменное напряжение частотой 50 Гц и действующим (эффективным) напряжением $U = 220$ В.

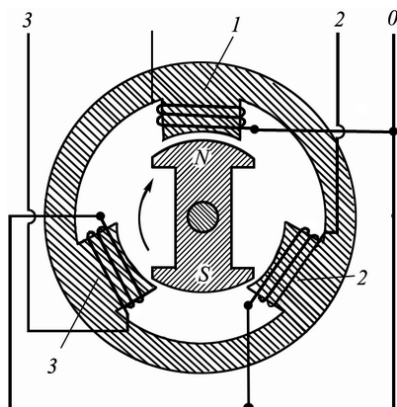
Вольтметры и амперметры градуируются по действующим значениям напряжения и тока.

Генератор переменного тока может содержать в статоре не одну, а три катушки, сдвинутые одна относительно другой на 120° (см. рис.). При вращении между ними ротора, представляющего постоянный магнит, его полюса будут последовательно проходить мимо каждой катушки, возбуждая в них переменные электромагнитные силы. ЭДС в каждой из катушек отстает от предыдущей на 120° , поэтому

$$E_1 = E_0 \sin \alpha t,$$

$$E_2 = E_0 \sin(\alpha t - 120^\circ),$$

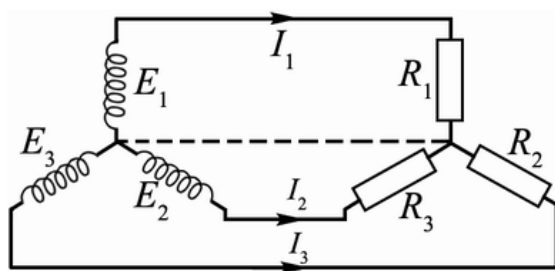
$$E_3 = E_0 \sin(\alpha t - 240^\circ).$$



Генератор трехфазного тока.

Если соединить начала всех катушек вместе и подсоединить концы всех катушек на равные сопротивления R между концом катушки и началом, то в нулевом проводе – проводе, соединяющем начала всех катушек, ток будет отсутствовать

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 = I_0(\sin \alpha t + \sin(\alpha t - 120^\circ) + \sin(\alpha t - 240^\circ)) = 0.$$

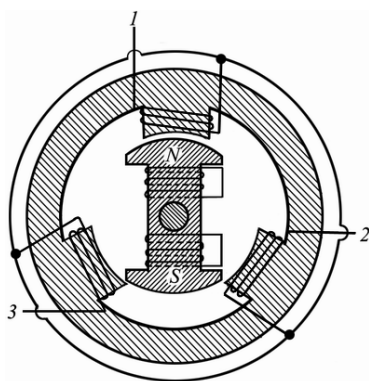


Это позволяет просто устранить нулевой провод. Линия электропередачи от трехфазного генератора имеет только три фазовых провода.

Трехфазная система позволяет получить вращающийся магнитный поток. Если подсоединить напряжение от

генератора к катушкам двигателя, соединенным так же, как катушки генератора, то в двигателе магнитный поток, оставаясь постоянным по величине, будет вращаться так же, как вращается магнитный поток, создаваемый электромагнитами ротора. Если трехфазный генератор выдает напряжение с частотой $(\omega/2\pi) = 50$ Гц, т.е. делает 3000 об/мин, то с такой же частотой будет вращаться магнитный поток в статоре электромотора.

Обращенный трехфазный генератор называется синхронным мотором (от греч. *syn* – вместе и *chronos* – время). Это название соответствует тому, что ротор и вращающееся поле делают строго одинаковое число оборотов – они вращаются «синхронно». Поэтому синхронный двигатель при запуске надо предварительно раскрутить до скорости вращения магнитного потока и следить за тем, чтобы механическая нагрузка не превышала вращающие возможности магнитного поля, иначе двигатель остановится. Все это ограничивает возможности синхронных двигателей.



Этих недостатков удастся избежать в «асинхронном» моторе (рис.). В отличие от синхронного двигателя, полюсные катушки ротора асинхронного двигателя замкнуты накоротко. Вращающийся магнитный поток наводит в них ЭДС и создает магнитный поток, препятствующий движению потока статора относительно ротора. В результате ротор стремится приобрести скорость вращения, равную частоте вращения магнитного поля статора. При создании тормозящего момента на ось ротора ротор тормозится

и не успевает за вращением магнитного поля статора, но при этом в катушках ротора вновь генерируется индукционный ток, величина и частота которого определяется скоростью вращения магнитного поля относительно ротора. Взаимодействие магнитного поля создает вращательный момент двигателя, что позволяет мотору преодолевать тормозной момент и совершать механическую работу.

Ускорители заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц – устройства, в которых под действием электрических и магнитных полей создаются пучки высокоэнергетических заряженных частиц (электронов, протонов, ионов и т.п.). Они применяются для экспериментов в физике атомного ядра и элементарных частиц, в последнее время находят и практическое применение (модификация свойств материалов, неразрушающие методы контроля, медицина).

Ускорители характеризуются типом ускоряемых частиц, энергией частиц, разбросом частиц по энергиям, интенсивностью пучка (током пучка).

По длительности пучка ускорители делятся на

- *непрерывные* (равномерные по времени пучки),
- *импульсные* (частицы вылетают порциями – импульсами, характеризуются длительностью импульса).

По форме траектории и механизму ускорения частиц ускорители делятся на

- *линейные*,
- *циклические*,
- *индукционные*.

В линейных ускорителях траектория движения – прямая линия, в циклических и индукционных – траекториями частиц являются окружности или спирали.

Линейные ускорители

Ускорение частиц осуществляется электрическим полем, создаваемым, например, высоковольтным генератором Ван-де-Граафа или генератором импульсного напряжения (ГИН) Аркадьева-Маркса. Заряженные частицы (q) проходят ускоряющую разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ электрического поля однократно, приобретают энергию $W = q(\varphi_1 - \varphi_2)$.

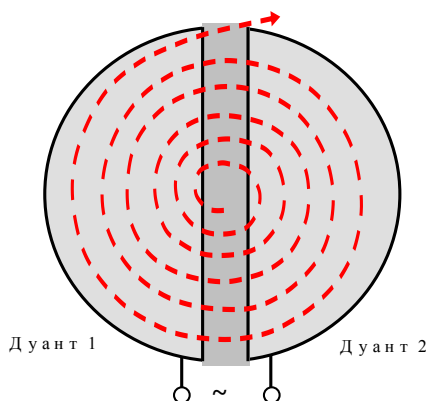
С помощью источников постоянного напряжения частицы ускоряются до ≈ 10 МэВ, дальнейшее увеличение энергии частиц ограничено утечками зарядов, пробоем изоляции.

Импульсные ускорители позволяют ускорять частица до сотен МэВ.

Циклотрон

В основу положена независимость периода обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле от её скорости $T = 2\pi \left| \frac{m}{q} \right| \frac{1}{B}$.

Циклотрон – циклический ускоритель тяжёлых частиц (протонов, ионов).



Он состоит из двух электродов в виде полых металлических полуцилиндров, называемых *дуантами*. Дуанты заключены в откачиваемый корпус, который помещен между полюсами электромагнита. Магнитное поле, создаваемое электромагнитом, однородное и перпендикулярно плоскости дуантов. К дуантам приложено переменное электрическое поле высокой частоты.

Заряженная частица q вносится в зазор между дуантами, ускоряется электрическим полем и втягивается в один из дуантов (1 на рис.). Пространство внутри дуанта является эквипотенциальным, поэтому частица в нём будет находиться под воздействием только магнитного поля. Частица в дуанте опишет

полуокружность, радиус которой пропорционален скорости частицы

$$qvB = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{qB}.$$

К моменту выхода частицы из дуанта 1 полярность напряжения U (направление вектора напряжённости электрического поля) изменяется, поэтому частица вновь ускоряется и, переходя в дуант 2, обладает большей скоростью и описывает там полуокружность большего радиуса и т.д.

Для непрерывного ускорения частиц необходимо выполнить *условие синхронизма* (условие «резонанса») – периоды вращения частицы в магнитном поле и колебаний электрического поля (U) должны быть равны.

Таким образом, частица движется по кривой, близкой к спирали, получая при каждом прохождении через зазор между дуантами дополнительную порцию энергии $q \cdot U$. На последнем витке, когда энергия частицы и радиус орбиты – максимально возможные, пучок частиц выводится из ускорителя с помощью отклоняющего электрического поля.

Циклотроны позволяют ускорить протоны до энергий ~ 20 МэВ. Дальнейшее их ускорение в циклотроне ограничивается релятивистским возрастанием массы со скоростью, что приводит к увеличению периода обращения и нарушению синхронизма.

Ускорение релятивистских частиц в циклических ускорителях осуществляется с применением *принципа автофазировки*: компенсация увеличения периода вращения частиц путём изменения либо частоты ускоряющего электрического, либо индукцию магнитного поля, либо того и другого. Этот принцип используется в *фазотроне, синхротроне, синхрофазотроне*.

Индукционный ускоритель электронов – бетатрон.

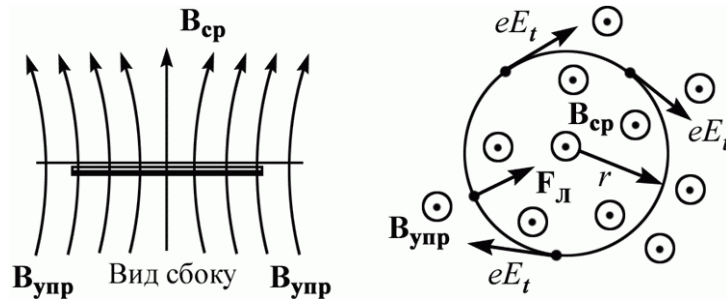
Электродвижущая сила индукции, создаваемая переменным магнитным полем, может существовать и в отсутствие проводников. Энергия, передаваемая вихревым электрическим полем единичному положительному заряду, равна

$$\mathcal{E} = \oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

т.е. интегралу по замкнутой траектории L от тангенциальной составляющей вихревого электрического поля. Согласно закону Фарадея, этот интеграл равен изменению магнитного потока через замкнутый контур L .

Вихревое электрическое поле может действовать на сгусток электронов,двигающихся в изменяющемся магнитном поле, и ускорять их. При определенных условиях движение электронов происходит в переменном магнитном поле по

орбите постоянного радиуса и является устойчивым, причем энергия электронов увеличивается за счет вихревого электрического поля, создаваемого изменяющимся магнитным потоком, пронизывающим орбиту частиц (рис.).



Циклический индукционный ускоритель электронов данного типа называется *бетатроном*.

Переменный центральный магнитный поток вектора $\mathbf{B}$ создает в бетатроне вихревую ЭДС индукции, ускоряющую электроны. Удержание электронов на стационарной круговой орбите осуществляется управляющим магнитным полем B_{ynp} , изменяющимся во времени определенным образом.

Под действием переменного магнитного поля на круговой орбите индуцируется ЭДС индукции, величина которой определяется законом Фарадея

$$\mathcal{E}_i = E_\tau 2\pi r = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

где Φ_B – поток магнитной индукции через орбиту.

Среднее значение вектора индукции магнитного поля внутри орбиты радиусом r

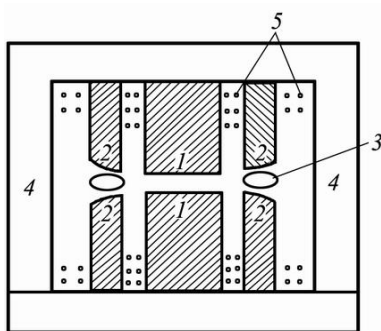
$$B_{cp} = \frac{\Phi_B}{\pi r^2}, \text{ т.к. } \Phi_B = B_{cp} \cdot S.$$

Напряженность тангенциальной составляющей вихревого электрического поля по модулю равна

$$E_\tau = \frac{1}{2\pi r} \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{1}{2\pi r} \frac{dB_{cp} \cdot S}{dt} = \frac{r}{2} \frac{dB_{cp}}{dt}.$$

Под действием силы $F = eE_\tau$ меняется импульс электрона

$$F = \frac{dp}{dt}.$$



Схематический разрез бетатрона: 1 – центральный сердечник; 2 – полосные наконечники; 3 – сечение кольцеобразной вакуумной камеры; 4 – ярмо магнита; 5 – обмотки электромагнита.

Для равновесной орбиты должно выполняться соотношение:

$$B_{\text{ср}}(t) = 2B_{\text{упр}}(t).$$

Для работы бетатрона необходимо, чтобы среднее магнитное поле внутри орбиты росло в два раза быстрее магнитного поля на самой орбите.

Это условие

$$\frac{dB_{\text{ср}}(t)}{dt} = 2 \frac{dB_{\text{упр}}(t)}{dt}$$

называют бетатронным условием, условием Видероз или «условием 2:1».

В бетатроне не существует проблемы синхронизации. Электроны в бетатроне ускоряются до энергий 100 МэВ. При энергии более 100 МэВ режим ускорения нарушается электромагнитным излучением электронов.

Идея бетатрона была запатентована в 1922 г. Дж. Слепяном. В 1928 г. Р. Видероз сформулировал условие существования равновесной орбиты – орбиты постоянного радиуса. Первый действующий бетатрон был создан в 1940 г. Д. Керстом на основе разработанной им совместно с Р. Сербером теории движения электрона и тщательной отработки конструкции ускорителя. В СССР первые бетатроны были разработаны и созданы учеными Томского политехнического института: профессорами А.А. Воробьевым, Л.М. Ананьевым, В.И. Горбуновым, В.А. Москалевым, Б.Н. Родимовым. В последующие годы в институте интроскопии при ТПУ были разработаны и созданы малогабаритные переносные бетатроны, применяемые в медицине, дефектоскопии и других прикладных и научных исследованиях (профессор В.Л. Чахлов).

Благодаря простоте конструкции, дешевизне и удобству пользования бетатроны нашли особо широкое применение в прикладных целях в диапазоне энергии 20÷50 МэВ. Используется непосредственно сам электронный пучок или тормозное γ – излучение, энергия которого может плавно изменяться.