

Сила же f_{\parallel} гонит электроны вдоль контура, т. е. совершают электрическую работу. Подставляя вместо f_{\perp} в (41.31) $f_{\text{мех}}$, согласно (41.32) получаем

$$f_{\parallel} u dt - f_{\text{мех}} v dt = 0,$$

или

$$f_{\text{мех}} v dt = f_{\parallel} u dt. \quad (41.33)$$

Эта формула показывает, что *механическая работа, произведенная над каждым электроном приложенной к рамке внешней силой, отдается этим электроном обратно (и полностью) в виде электрической работы в контуре.*

Обратим внимание читателя на следующее существенное обстоятельство. В § 36 было показано, что в постоянном магнитном поле лоренцова сила не производит работы над движущейся в этом поле заряженной частицей (см. (36.12) и (36.13)). Здесь же мы показали, что работа тока, вызванного э. д. с. индукции, в конечном счете обусловлена действием лоренцовых сил на электроны в контуре. Противоречие?

Никакого противоречия нет. И в рассматриваемом случае результат § 36 (равенство нулю работы лоренцовой силы) учтен формулой (41.30), принявшей теперь вид (41.33).

В данном случае равенство нулю полной работы, производимой лоренцовой силой над подвижными электронами (41.30), (41.31), выражает здесь закон сохранения энергии: механическая работа, произведенная над контуром, превращается целиком в работу электрических сил в этом контуре.

Из сказанного ранее очевидно следует, что для получения электрической работы не обязательно механические силы прилагать к самому контуру. Так, например, вместо деформации контура с помощью внешней силы, как это имело место в рассмотренном примере, можно, оставляя контур неизменным, вталкивать в него магнит (т. е. менять поток Φ через контур). При этом работа, затраченная на перемещение магнита, превратится в работу электрических сил в контуре.

§ 42. Вращение рамки в магнитном поле

Явление электромагнитной индукции позволяет преобразовывать энергию механического движения в энергию электрического тока и уже около 100 лет широко используется в технике для этой цели. Для выяснения основных принципов и закономерностей промышленных методов генерирования электрического тока рассмотр-

рим простейший пример плоской рамки, вращающейся в однородном магнитном поле, изображенной на рис. 3.61, а и б.

Обозначим площадь рамки через S и угол между нормалью к рамке n и линиями вектора B через α . Тогда магнитный поток, сцепленный с рамкой, будет равен

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (42.1)$$

Начнем равномерно вращать рамку с угловой скоростью ω . Угол α будет расти со временем линейно по закону

$$\alpha = \omega t. \quad (42.2)$$

В рамке тогда будет возникать переменная э. д. с. индукции. В системе единиц СИ

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{инд}} &= -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t = \\ &= \mathcal{E}_{\text{макс}} \sin \omega t. \end{aligned} \quad (42.3)$$

Зависимость $\mathcal{E}_{\text{инд}}$ от времени носит периодический (синусоидальный) характер и изображена на рис. 3.62. Величина

$$\mathcal{E}_{\text{макс}} = BS\omega = \mu\mu_0 HS\omega \quad (42.4)$$

определяет максимальные значения, достигнутые колеблющейся э. д. с., и называется амплитудой электродвижущей силы или амплитудой напряжения, созданного подобной моделью генератора переменного тока

Как видно из (42.4), для увеличения напряжения \mathcal{E} на зажимах генератора следует увеличивать величины ω , H , μ и S . Значительное увеличение скорости вращения генератора ω приводит к сильному возрастанию механических напряжений во вращающихся частях. Поэтому во многих странах, в том числе и у нас, принята стандартная частота переменного тока $v = \omega/2\pi = 50$ герц. В некоторых странах стандартная частота тока $v = 60$ герц.

Увеличение магнитной индукции поля B требует установки мощных постоянных магнитов или значительного тока в случае электромагнитов. Поэтому помещают внутрь рамки и электромагнита сердечники из ферромагнитных материалов с большой магнитной проницаемостью μ .

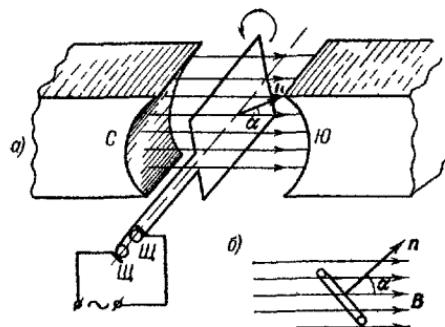


Рис. 3.61.

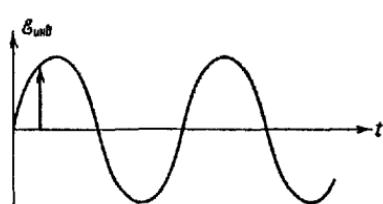


Рис. 3.62.

Наконец, для увеличения S в генераторе вращают не один виток, а целый ряд витков, соединенных последовательно друг с другом.

В результате использования всех этих возможностей современные генераторы переменного тока могут создавать напряжение в несколько десятков тысяч вольт при мощности до 500 000 квт в одном агрегате *).

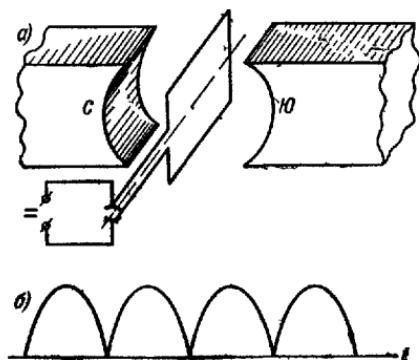


Рис. 3.63.

На рис. 3.63, б изображена зависимость напряжения E на щетках от времени при такой коммутации. Видно, что ток получается постоянным по направлению, но пульсирующим по величине.

Для сглаживания этих пульсаций применяют следующий способ. Вместо одной рамки применяется несколько. Каждая из них соединяется со щетками в тот момент, когда индуцируемая в ней э. д. с. оказывается по величине наибольшей. На рис. 3.64, а показан простейший случай, когда вращающаяся часть генератора состоит из двух рамок, плоскости которых находятся под углом в 90° .

На рис. 3.64, б показаны токи, снимаемые с каждой рамки, и суммарный ток. Увеличение числа рамок приводит к еще большему сглаживанию тока.

*) Проектируемые в СССР для ряда электростанций генераторы будут иметь еще большую мощность.

Переменное напряжение снимается с вращающегося витка с помощью щеток ю, схематически изображенных на рис. 3.61. Для получения постоянного тока следует изменить схему коммутации. На рис. 3.63, а изображена схема расположения щеток, при которой виток, повернувшись на 180° , соприкасается с той же самой щеткой противоположным концом.

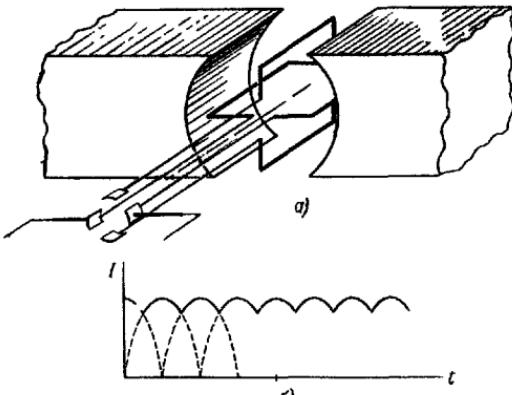


Рис. 3.64.

Процесс превращения механической энергии в электрическую можно обратить. Если через рамку, помещенную в магнитное поле, пропускать электрический ток, то в соответствии с (29.3) на нее будет действовать крутящий момент и рамка начнет вращаться. В этом случае мы получим электрический мотор. Первый электрический двигатель был сконструирован Б. С. Якоби и приводился в действие током от батареи из 320 гальванических элементов. В 1839 г. по Неве стал плавать первый в мире электроход, приводившийся в движение этим двигателем. В настоящее время многочисленные электрические двигатели самой различной мощности приводят в движение станки, электровозы, подводные лодки, электротракторы и другие агрегаты. Схемы и конструкции различных электродвигателей и генераторов тока рассматриваются в курсе электротехники.

§ 43. Взаимная индукция. Трансформаторы

Переменное магнитное поле, индуцирующее ток, само в свою очередь может создаваться переменными токами, текущими по другим проводам или в том же контуре. В этих случаях мы говорим о явлениях взаимной индукции и самоиндукции.

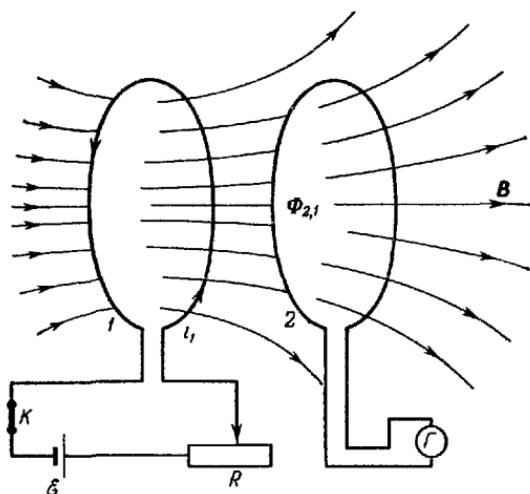


Рис. 3.65

Рассмотрим сначала взаимную индукцию двух токов. Контур I_1 , изображенный на рис. 3.65, присоединен к источнику тока \mathcal{E} . С помощью реостата R можно менять ток i_1 в этом контуре, а ключом K можно этот ток полностью выключать или включать. Ток i_1 создает вокруг себя магнитное поле, линии индукции