

довательно соединенных одинаковых витков. Пусть ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна направлению поля. Тогда в каждом витке индуцируется э. д. с., выражаемая формулой (19.14). Все эти э. д. с. создают в витках одинаковые по направлению индукционные токи. Поэтому все э. д. с. имеют одинаковый знак, и результирующая э. д. с. индукции в рамке равна их арифметической сумме:

$$\mathcal{E}_i = NB_0S\omega \sin \omega t. \quad (19.19)$$

11. При выводе формул (19.13)—(19.16) и (19.19) мы предполагали, что магнитный поток Φ_m сквозь поверхность, ограниченную витком, создается только в нем и магнитным полем. Однако это не вполне точно, так как индукционный ток в витке также создает магнитное поле, которое накладывается на внешнее поле. Поэтому полный магнитный поток Φ_m нужно определять по формуле, отличной от (19.13):

$$\Phi_m = B_0S \cos \omega t + \int_S B_n dS, \quad (19.13')$$

где B_n — проекция на нормаль к плоскости витка вектора \mathbf{B} магнитной индукции поля, создаваемого индукционным током в витке. Второе слагаемое правой части уравнения (19.13') представляет собой так называемый **магнитный поток самоиндукции контура** Φ_{mc} . В электротехнике его называют, как уже указывалось в § 17.4, потокоцеплением самоиндукции. Способ вычисления Φ_{mc} рассмотрен в § 19.4.

Из основного закона электромагнитной индукции и выражения (19.13') следует, что э. д. с. индукции и индукционный ток в контуре равны:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_m}{dt} = B_0S\omega \sin \omega t - \frac{d\Phi_{mc}}{dt}, \quad (19.14'')$$

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{B_0S\omega}{R} \sin \omega t - \frac{1}{R} \frac{d\Phi_{mc}}{dt}. \quad (19.16')$$

§ 19.3. Вихревые токи (токи Фуко)

1. До сих пор мы рассматривали индукционные токи в **линейных контурах**, т. е. в проводниках, поперечные размеры которых пренебрежимо малы по сравнению с их длиной. Однако индукционные токи возникают и в массивных проводниках. Отличие этих токов от индукционных в линейных проводниках состоит в том, что для их возникновения нет необходимости включать проводник в замкнутую цепь. Замкнутая цепь индукционного тока образуется в толще самого проводника. Поэтому индукционные токи в массивных проводниках носят вихревой характер.

2. Сила вихревого тока по закону Ома равна

$$I_{\text{вихр}} = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = - \frac{1}{R} \frac{d\Phi_m}{dt}, \quad (19.20)$$

где Φ_m — магнитный поток, сцепленный с контуром тока, R — сопротивление цепи вихревого тока. Подсчитать это сопротивление трудно. Однако совершенно очевидно, что оно тем меньше, чем больше удельная проводимость материала проводника и чем больше его размеры. В массивных проводниках R мало и вихревые токи могут достигать большой силы даже в не очень быстро меняющихся магнитных полях (например, в магнитном поле, создаваемом обычным переменным током, частота которого 50 Гц).

3. Вихревые токи вызывают сильное нагревание проводников. На это впервые обратил внимание французский физик Л. Фуко, поэтому вихревые токи обычно называют **токами Фуко**. Из закона Джоуля—Ленца и формулы (19.20) следует, что количество теплоты, выделяемое в единицу времени вихревым током, пропорционально квадрату частоты изменения магнитного поля. Поэтому в индукционных печах, служащих для плавки металлов при помощи токов Фуко, магнитное поле создается переменным током высокой частоты.

В электрических машинах и трансформаторах токи Фуко приводят к значительным потерям энергии. Ввиду этого магнитные цепи электрических машин и сердечники трансформаторов делают не сплошными, а собирают из отдельных тонких листов железа, изолированных друг от друга специальным лаком или окалиной. Токи Фуко образуются в плоскостях, перпендикулярных линиям магнитной индукции (токи «охватывают» линии индукции). Поэтому плоскости пластин, из которых собирают магнитные цепи, следует располагать параллельно линиям магнитной индукции. Таким образом, можно сильно увеличить электрическое сопротивление магнитной цепи, почти не меняя ее магнитного сопротивления. Для увеличения удельного электрического сопротивления магнитных цепей к железу добавляют небольшую примесь кремния. Магнитные цепи и сердечники электрических установок, работающих при высоких частотах, изготавливают из **магнитодиэлектриков**, представляющих собой спрессованные под большим давлением смеси порошкообразных ферромагнитных веществ (см. § 20.6) и диэлектриков.

Развитие техники высоких и сверхвысоких частот потребовало создания материалов, в которых вредное влияние вихревых токов было бы минимальным. Поэтому магнитодиэлектрики стали изготавливать в виде тонких листов и лент, но это привело к их удорожанию и ухудшению магнитных свойств таких материалов. Проблема получения магнитных материалов с малой электропроводностью была решена в 40—50-х годах путем создания **ферритов** — полупроводниковых ферромагнитных материалов с удельным сопротивлением, в миллиарды раз превышающим удельное сопротивление металлических ферромагнитных веществ. Ферриты представляют собой химические соединения оксидов железа (Fe_2O_3) с оксидами других металлов. Общая формула для простых ферритов имеет вид $MeOFe_2O_3$, где Me — двухвалентный металл (например, Mg , Ni , Co , Mn , Cu , Zn и др.). Ферритовые изделия производят методом керамики, т. е. путем прессования порошкообразного вещества и последующего спекания при температурах свыше $1000^\circ C$.

4. На вихревые токи, возникающие в массивных проводниках при их движении в магнитном поле, действуют амперовы силы. В согласии с правилом Ленца вихревые токи имеют такое направление, что действующие на них амперовы силы должны тормозить движение проводника. В качестве иллюстрации рассмотрим следующий опыт. Между полюсами сильного электромагнита качается массивный алюминиевый маятник (рис. 19.10,а). Если ток в обмотке электромагнита отсутствует, то маятник совершает слабо затухающие колебания. При включении тока затухание колебаний резко возрастает. Если магнитное поле достаточно сильное, то колебания маятника становятся аperiodическими—отклоненный маятник медленно возвращается в положение равновесия. Это явление широко используется для гашения колебаний подвижных систем электроизмерительных приборов.

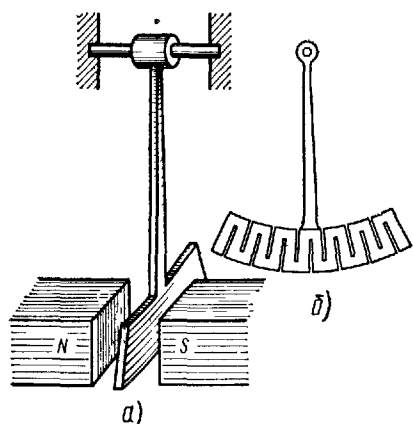


Рис. 19.10

Затухание колебаний маятника в магнитном поле уменьшится, если увеличить электрическое сопротивление маятника для индукционных токов. Это можно осуществить, сделав в маятнике большое число узких поперечных вырезов (рис. 19.10,б).

5. Токи Фуко действуют на источники индуктирующего их магнитного поля. Наглядным примером этого являются опыты Араго, рассмотренные в начале § 19.1. Вихревые токи, возникающие в медной пластинке при колебаниях расположенной вблизи нее магнитной стрелки, по закону Ленца тормозят движение стрелки. Наоборот, если стрелка неподвижна, а расположенная над стрелкой параллельная ей пластинка приводится в быстрое вращение, то в этой пластинке также возникают вихревые токи. Причина появления этих токов заключается в движении пластинки в магнитном поле стрелки. Если стрелка вращается синхронно с пластинкой, то в последней не возникает индукционного тока. По закону Ленца, индукционные токи Фуко в пластине противодействуют причине, вызвавшей их возникновение. Поэтому вращающаяся пластина увлекает за собой магнитную стрелку.

§ 19.4. Явление самоиндукции

1. Вокруг всякого проводника с током существует магнитное поле. Собственное магнитное поле контура создает магнитный поток самоиндукции $\Phi_{то}$ сквозь поверхность S , натянутую на этот контур: