

68 Вихревые токи. Энергия магнитного поля

При протекании переменного тока по обмотке катушки возникает переменный магнитный поток, под действием которого в результате электромагнитной индукции будет наводиться ЭДС во всех контурах, пронизываемых магнитным потоком, а следовательно, и в стальном сердечнике. В результате возникают токи, которые замыкаются по сердечнику (рис. 7.5, а), их называют *вихревыми* или *токами Фуко*.

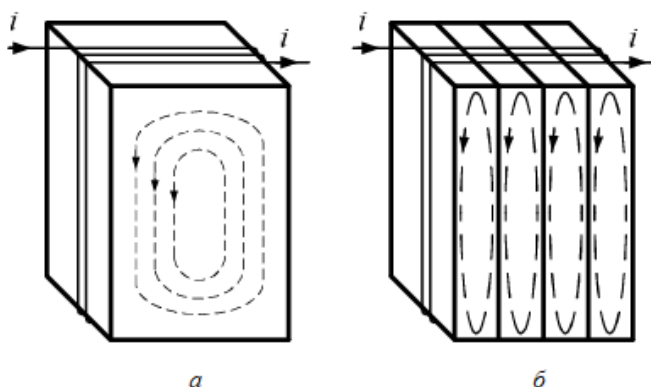


Рис. 7.5. Схематическое изображение прохождения вихревых токов: *а* – в сплошном сердечнике; *б* – в изолированных листах сердечника

Согласно закону Джоуля – Ленца, вихревые токи вызывают нагрев сердечника, т. е. имеет место потеря электрической энергии. Кроме того, токи Фуко создают свой магнитный поток, который согласно правилу Ленца будет направлен против основного магнитного потока, вызвавшего вихревые токи, т. е. оказывает размагничивающее действие.

Для уменьшения потерь энергии от вихревых токов и снижения размагничивающего действия магнитопроводы изготавливают из тонких листов стали, изолированных друг от друга лаком (рис. 7.5, б). Уменьшение токов Фуко в этом случае происходит за счет повышения электрического сопротивления, поскольку токи замыкаются в тонких листах по узким вытянутым путям.

Плоскость листов должна быть параллельна направлению магнитного потока, чтобы не увеличивалось магнитное сопротивление.

Для различных частот существуют свои оптимальные толщины листов. В частности, при промышленной частоте 50 Гц применяют листы толщиной 0,35–0,5 мм, при частотах порядка тысяч герц – листы толщиной 0,02–0,05 мм, а при более высоких частотах толщина листов доходит до 0,005 мм.

С целью повысить электрическое сопротивление при производстве электротехнической стали добавляют до 4,8 % кремния.

При высоких частотах (30–50 МГц) применяют сердечники, выполненные из магнитодиэлектриков или ферритов, которые обладают большим удельным электрическим сопротивлением.

На практике вихревые токи используются для нагрева металлов (плавление стали, нагрев под закалку и для других целей).

7.8. Энергия магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля

Рассмотрим энергию уединенной индуктивной катушки. Пусть катушка с сопротивлением R и индуктивностью L подключена к источнику энергии с ЭДС e . Тогда по второму закону Кирхгофа имеем

$$e = Ri + \frac{d\Psi}{dt},$$

где Ψ – потокосцепление индуктивной катушки;

$\frac{d\Psi}{dt}$ – падение напряжения, уравнивающее ЭДС самоиндукции.

Работу источника энергии за время dt определим, умножив уравнение второго закона Кирхгофа на idt :

$$eidt = ri^2dt + id\Psi.$$

Первое слагаемое правой части равенства есть энергия, теряемая в виде теплоты в активном сопротивлении R , второе слагаемое есть энергия, создающая магнитное поле катушки, обозначим ее dW_m :

$$dW_m = id\Psi.$$

Полная энергия, запасенная в магнитном поле катушки, при изменении потокосцепления от 0 до Ψ

$$W_m = \int_0^{\Psi} id\Psi.$$

Для катушек с неферромагнитным сердечником $\Psi = Li$ и $d\Psi = Ldi$, поэтому

$$W_{\text{м}} = L \int_0^i i di = \frac{Li^2}{2},$$

или

$$W_{\text{м}} = \frac{\Psi i}{2}.$$

Объемную плотность энергии магнитного поля определим на примере катушки с кольцевым сердечником (см. п. 5.9), у которой магнитное поле в сердечнике можно считать равномерным:

$$\Psi = BSN; \quad i = \frac{Hl}{N},$$

где l – средняя длина сердечника.

Тогда

$$W_{\text{м}} = \frac{\Psi i}{2} = \frac{BSN}{2N} Hl = \frac{BHV}{2},$$

где $V = Sl$ – объем сердечника.

Энергия магнитного поля в единице объема

$$\frac{W_{\text{м}}}{V} = \frac{BH}{2}.$$

Здесь энергия выражена через характеристики магнитного поля, что свидетельствует о ее принадлежности к магнитному полю.



Вопросы и задачи для самоконтроля

1. Расскажите, в чем суть электромагнитной индукции.
2. Запишите, чему равна ЭДС, индуцированная в контуре (катушке).
3. Сформулируйте правило Ленца.
4. Запишите, чему равна ЭДС, индуцированная в проводнике, пересекающем магнитное поле.
5. Сформулируйте правило правой руки.
6. Запишите, чему равна электромагнитная сила, действующая на проводник с током в магнитном поле.