

Как работает трансформатор с ферромагнитным сердечником?

Ф. Ф. Менде

Особенностью любого трансформатора является возможность передачи энергии из одной обмотки в другую без наличия гальванического контакта между ними. Причём чем ближе расположены витки первичной и вторичной обмоток, тем больше коэффициент связи между обмотками. Если речь идёт о трансформаторе без наличия железного сердечника, то идеальным вариантом является тот случай, когда обмотки намотаны бифилярным способом, когда обмотка мотается в два провода, которые и представляют первичную и вторичную обмотки. При таком способе намотки провода первичной и вторичной обмотки располагаются максимально близко, что и даёт возможность получить максимальный коэффициент связи. Но существует случай, когда две обмотки, находящиеся на большом расстоянии друг от друга, будучи расположены на общем ферромагнитном сердечнике, имеют очень высокий коэффициент связи. Ни в одном учебном пособии нет описания физики работы трансформатора с таким сердечником, и нигде не описано, какова физика процесса, обеспечивающая этот феномен.

Имеется хорошо известный экспериментальный факт, что наличие ферромагнитного сердечника в катушке существенно увеличивает её индуктивность. И опять же, какова физика этого процесса нигде не описано.

Если по катушке или отдельному проводу течёт ток, то энергия, накопленная в их индуктивности, определяется соотношением

$$W_L = \frac{1}{2} LI^2$$

Индуктивность провода, по которому течёт ток, связывают с наличием вокруг такого провода магнитных полей и поскольку магнитные поля обладают удельной энергией

$$W_{0H} = \frac{1}{2} \mu H^2,$$

то их интегрирование по объёму, занимаемому полями также даёт энергию

$$W_H = \frac{1}{2} \mu \int_V H^2 dV.$$

Очевидно, что

$$W_L = W_H.$$

Но магнитные поля, окружающие проводник или катушку, зависят от тока, поэтому индуктивность это коэффициент, который зависит от конфигурации проводника и который связывает энергию, накопленную в таком проводнике с текущим в нём токе. До сих пор мы всегда связывали эту индуктивность с теми магнитными полями, которые окружают рассматриваемый проводник. Но, оказывается, существует и другой механизм увеличения индуктивности проводника, когда индуктивность зависит не только от его конфигурации и тех магнитных полей, которые такой проводник окружают (рис. 1).

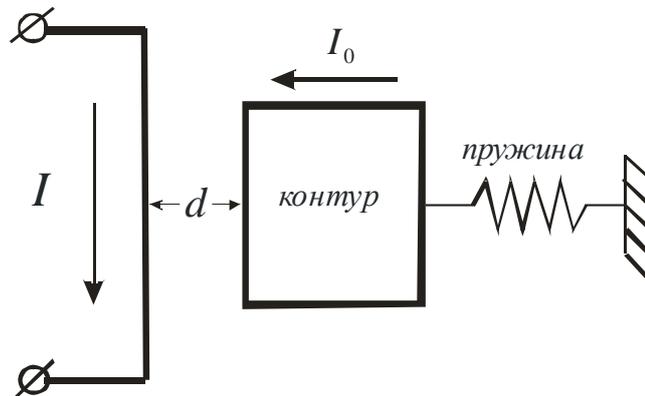


Рис. 1. Контур с замороженным током вблизи проводника, по которому течёт ток.

Предположим, что у нас имеется сверхпроводящий контур, в котором заморожен ток I_0 , расположенный на расстоянии d от проводника, по которому течёт ток I . Контур с замороженным током закреплён при помощи пружины к жесткому основанию. Если мы начнём пропускать ток через проводник, то контур начнёт к нему притягиваться, растягивая пружину и, тем самым, запасая в ней энергию. Причём, чем больше будет ток в контуре, тем сильнее он будет притягиваться к проводу, и тем большая энергия будет накапливаться в пружине. Поэтому при одних и тех же значениях тока в проводнике, энергия, израсходованная для растяжения пружины, будет разная и будет она зависеть, в том числе, и от тока в короткозамкнутом контуре. Рассмотренная система эквивалентна индуктивности с той лишь разницей, что энергия в такой индуктивности будет накапливаться не в магнитном поле, а в пружине. Причём индуктивность в данном случае будет зависеть и от расстояния между контуром и проводником, и от тока, замороженного в контуре. Характерной особенностью рассмотренной системы является и то, что приближение контура с замороженным током к проводу, по которому течёт ток, будет приводить к индуцированию в нём токов, противоположных исходному току. Таким образом, результирующий ток окажется меньше того тока, который имел бы место при отсутствии

контура с замороженным током. Такое поведение суммарного тока свидетельствует об увеличении индуктивности провода, по которому течёт ток.

Можно представить и другой вид такой системы. Для этого нужно контур с замороженным током поместить на оси, проходящей, через его центр, а к оси прикрепить спиральную пружину, обеспечивающей устойчивое состояние контура в положении, когда его проводники равноудалены от проводника с током (рис. 2). Тогда при протекании тока через проводник контур будет поворачиваться в ту или другую сторону, закручивая спиральную пружину, накапливая в ней энергию. Причём направление закручивания пружины будет зависеть от направления тока в проводнике. Именно такой специфический вид индуктивности и работает при взаимодействии проводников с током с ферромагнетиками.

До тех пор, пока на ферромагнетик не наложено стороннее внешнее магнитное поле, его атомы или молекулы, которые представляют микроскопические контура, в которых заморожены микроскопические токи, находятся в разупорядоченном состоянии. Такое состояние является для них равновесным. Но как только на ферромагнетик накладывается внешнее поле, начинает происходить их ориентация, подобно той, которая изображена на рис. 1. На осуществление процесса отклонения от равновесного состояния расходуется энергия, которая и представляет индуктивную энергию проводника с током. Причём, как уже было сказано, расстояние между самим проводником и ферромагнетиком может быть разным, и зависит оно от величины микроскопических замороженных токов.

Если ток, текущий через проводник, является переменным, то рассмотренный процесс является реактивным. При этом атомы или молекулы, представляющие контура с током, осуществляют вращательно-колебательное движение и энергия, накопленная в пружине, попеременно то накапливается в ней, то отдаётся обратно проводнику с током.

Теперь рассмотрим процесс, при котором ферромагнитный сердечник обеспечивает большой коэффициент связи между удалёнными проводниками, передавая тем самым энергию из одного проводника в другой.

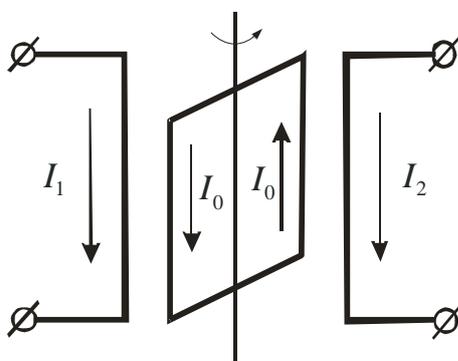


Рис. 2. Передача токов индукции из одного проводника в другой при наличии между ними ферромагнетика.

Если в первичном контуре увеличивается ток, то проводник этого контура начинает притягивать к себе проводник короткозамкнутого витка с замороженным током. Закручивание контура приводит к тому, что его противоположная сторона начинает приближаться к проводнику вторичного контура, индуцируя в нём ток индукции. Если вторичный контур разомкнут, и энергия в нём не расходуется, то он не влияет на процессы в такой системе. Если же вторичный контур нагружен на активное сопротивление, то поворот контура с замороженным током требует расхода активной энергии. Этот поворот осуществляет первичный контур, из которого эта энергия забирается. Это приводит к тому, что первичный контур для источника питания превращается из чисто индуктивной нагрузки в смешанную, в которой будет присутствовать и активная составляющая. Эта активная составляющая будет определяться разностью потенциалов на клеммах вторичного контура и сопротивлением к ним подключенного.

Если имеется две катушки, расположенные на общем ферромагнитном сердечнике, то первичная катушка, в которую вводят ток, осуществляет синхронный поворот всех микроскопических контуров с замороженным током. Сложение токов этих контуров приводит к образованию макроскопического тока внутри ферромагнетика, который по схеме, изображенной на рис. 2, взаимодействует с проводником и первичного, и вторичного контура.