

# ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

---

---

**Ф.Ф. МЕНДЕ**

доктор техн. наук, директор  
НИИ Криогенного приборостроения  
Физико-технический институт низких температур  
им Б.И. Веркина НАН Украины  
Харьков, Украина  
E-mail: mende\_fedor@mail.ru

## О РАБОТЕ ТРАНСФОРМАТОРА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

*Особенностью работы любого трансформатора является возможность передачи энергии из одной обмотки в другую без наличия гальванического контакта между ними. Причем чем ближе расположены витки первичной и вторичной обмоток, тем больше коэффициент связи между обмотками. Если речь идет о трансформаторе без ферромагнитного сердечника, то оптимальным вариантом является тот случай, когда обмотки намотаны бифилярным способом. Наличие общего ферромагнитного сердечника существенно увеличивает коэффициент связи между обмотками, разнесенными в пространстве, но в учебных пособиях и других публикациях отсутствует описание физических процессов, обеспечивающих этот процесс. В статье показано, почему наличие ферромагнитного сердечника увеличивает индуктивность обмотки, а также то, каким образом наличие такого сердечника увеличивает коэффициент связи между обмотками и обеспечивает передачу энергии из одной обмотки в другую.*

**Ключевые слова:** трансформатор, индуктивность, ферромагнетик, коэффициент связи.

**F.F. MENDE**

Doctor of Techn. Sciences, Director  
Research institute for cryogenic instrument  
engineering B.I. Verkin Institute for Low Temperature  
Physics and Engineering NAS Ukraine  
Kharkov, Ukraine  
E-mail: mende\_fedor@mail.ru

## ON THE WORK TRANSFORMER WITH THE FERROMAGNETIC CORE

*The possibility of the energy transfer of one winding to another without the presence of galvanic contact between them is the special feature of the work of any transformer. Moreover the nearer are located the turns of primary and secondary windings, the greater the coupling coefficient between the windings. If the discussion deals with the transformer without the ferromagnetic core, then that case, when windings are wound by bifilar method, is optimum version. The presence of common ferromagnetic core substantially increases coupling coefficient between the windings, spread in the space, but in the teaching aids and other publications there is no description of the physical processes, which ensure this process. In the article it is shown, why the presence of ferromagnetic core increases the inductance of winding, and also how the presence of this core increases coupling coefficient between the windings and ensures the energy transfer of one winding to another.*

**Key words:** transformer, inductance, ferromagnetic, coupling coefficient.

## 1. Физика работы трансформатора с ферромагнитным сердечником

Особенностью работы любого трансформатора является возможность передачи энергии из одной обмотки в другую без наличия гальванического контакта между ними. Причем чем ближе расположены витки первичной и вторичной обмоток, тем больше коэффициент связи между обмотками. Если речь идет 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 дает 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 существенным образом увеличивает ее индуктивность. И опять же, какова физика этого процесса нигде не описано.

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

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

Индуктивность провода, по которому течет 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 объему, занимаемому полями также дает 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 нем током. 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).

Предположим, что у нас имеется сверхпроводящий контур, в котором заморожен ток  $I_0$ , расположенный на расстоянии  $d$  от проводника, по которому течет ток  $I$ .

Контур с замороженным током закреплен при помощи пружины к жесткому основанию. Если пропускать ток через проводник, то контур начнет к нему притягиваться, растягивая пружину и, тем самым, запасая в ней энергию. Причем, чем больше будет замороженный 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. Причем 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

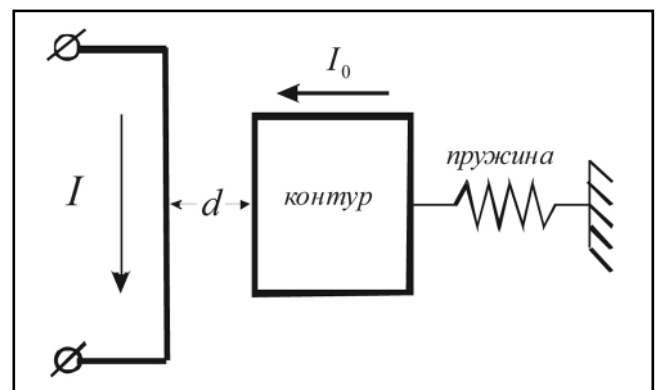


Рис. 1. Контур с замороженным током вблизи проводника, по которому течет ток

контура с замороженным током к проводу, по которому течет ток, будет приводить к индуцированию в нем 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 течет 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. Причем направление закручивания пружины будет зависеть от направления тока в проводнике. Именно такой специфический вид индуктивности и работает при взаимодействии проводников с током с ферромагнетиками, поскольку атомы или молекулы ферромагнетика представляют магнитные диполи с замороженным кольцевым током.

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, начинается происходить их ориентация, подобно той, которая изображена на рисунке 1. На осуществление процесса отклонения от равновесного состояния расходуется энергия, которая и представляет индуктивную энергию проводника с током.

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 отдается обратно проводнику с током.

Теперь рассмотрим процесс, при котором ферромагнитный сердечник может обеспечивать

большой коэффициент связи между удаленными проводниками, передавая тем самым энергию из одного проводника в другой.

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 нем ток индукции. Если вторичный контур разомкнут, и энергия в нем 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 реактивной индуктивной нагрузки в комплексную, 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 рисунке 2, взаимодействует с проводником и первичного, и вторичного контура. Это свойство ферромагнетика и обеспечивает передачу энергии из первичной обмотки во вторичную. В случае, когда энергия во вторичной обмотке не потребляется,

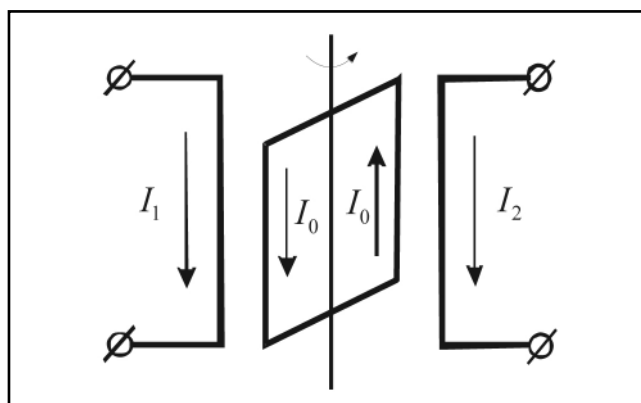


Рис. 2. Передача токов индукции из одного проводника в другой при наличии между ними ферромагнетика

ферромагнетик только увеличивает индуктивность первичной обмотки.

### Заключение

Особенностью работы любого трансформатора является возможность передачи энергии из одной обмотки в другую без наличия гальванического контакта между ними. Причем чем ближе расположены витки первичной и вторичной обмоток, тем больше коэффициент связи между обмотками. Если речь идет о трансформаторе без ферромагнитного сердечника, то оптимальным вариантом является тот

случай, когда обмотки намотаны бифилярным способом. Наличие общего ферромагнитного сердечника существенно увеличивает коэффициент связи между обмотками, разнесенными в пространстве, но в учебных пособиях и других публикациях отсутствует описание физических процессов, обеспечивающих этот процесс. В статье показано, почему наличие ферромагнитного сердечника увеличивает индуктивность обмотки, а также то, каким образом наличие такого сердечника увеличивает коэффициент связи между обмотками и обеспечивает передачу энергии из одной обмотки в другую.

---

---

### Сведения об авторе

*Менде Федор Федорович, доктор техн. наук, директор*

*E-mail: mende\_fedor@mail.ru*

*НИИ Криогенного приборостроения Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины*

*61103, Украина, Харьков, пр. Ленина, 47*

### Information about author

*Mende Fedor F., Doctor of Techn. Sciences, Director*

*E-mail: mende\_fedor@mail.ru*

*Research institute for cryogenic instrument engineering B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering NAS Ukraine*

*61103, Kharkov, Ukraine, Lenin Ave., 47*

---

---

## Оформление заявки на авторский экземпляр журнала

На электронный адрес buchizdatelstva@mail.ru просим выслать следующие данные:

1. Название журнала и номер, в котором выходит статья, название статьи.
2. ФИО автора полностью.
3. Почтовый адрес с индексом.
4. Контактный телефон.
5. Отправить журнал по почте либо представитель заказчика забирает со склада в Издательстве.

После получения указанной информации оформляется банковское извещение на оплату авторского экземпляра со скидкой 50 %.

Дополнительные экземпляры оплачиваются полностью.