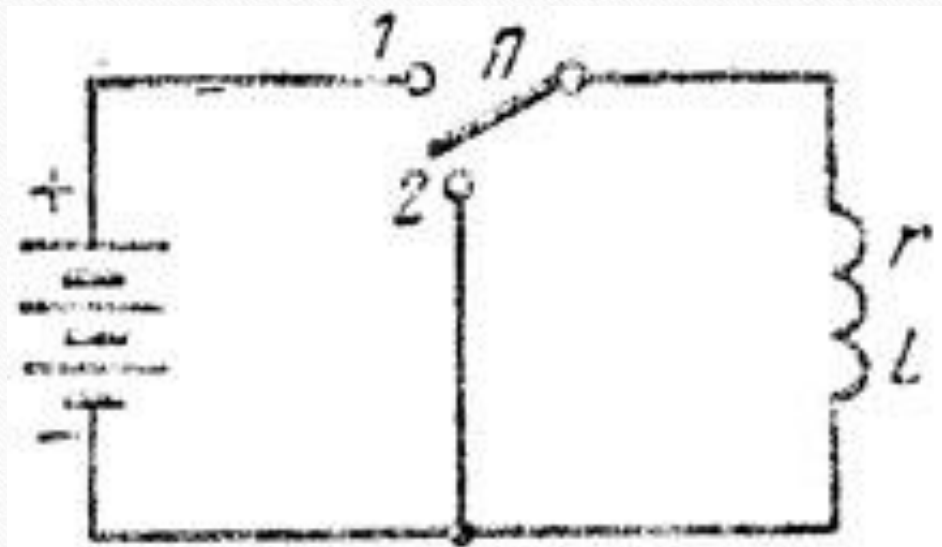
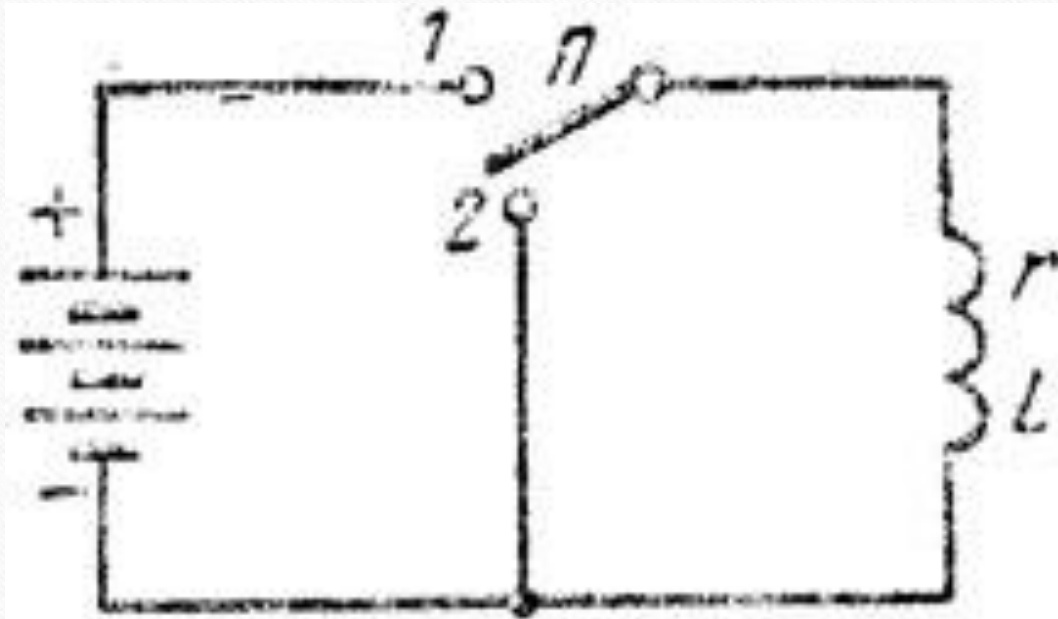


**Включение катушки,  
содержащей  $r$  и  $L$ , к  
источнику с  
постоянной э.д.с.  
отключение  
катушки. Энергия магнитного  
поля**



Соберем электрическую цепь, изображенную на рис. При помощи переключателя  $\Pi$  катушка, содержащая сопротивление  $r$  и индуктивность  $L$ , может подключаться к источнику с постоянной Э.Д.С. или замыкаться накоротко.



Поставим переключатель в положение 1. При этом катушка будет подключена к источнику. В цепи возникнет электрический ток, который создает магнитное поле внутри катушки. Как было описано в § 49, в момент замыкания цепи в катушке возникает э.д.с. самоиндукции, направление которой будет противоположно направлению э.д.с. источника, поэтому э.д.с. самоиндукции будет препятствовать нарастанию тока в цепи.

В произвольный момент времени  $t$  ток в цепи  $i$  определится алгебраической суммой э.д.с.: источника  $E$  и э.д.с. самоиндукции  $e_L$ :

$$i = \frac{E + e_L}{r} = \frac{E - L \frac{\Delta i}{\Delta t}}{r}.$$

Ток в цепи катушки после ее включения устанавливается не сразу. Вначале э.д.с. самоиндукции имеет наибольшее значение и ток в цепи мал. Со временем э.д.с. самоиндукции ослабевает и ток в цепи становится больше. И только когда установится постоянный магнитный поток катушки, э.д.с. самоиндукции исчезает, ток в цепи будет иметь максимальное постоянное значение, определяемое выражением

$$I = E / r.$$

Это значение тока называется установившимся. Мерой скорости нарастания тока в цепи с индуктивностью является отношение  $L/r$ . Эта величина имеет размерность времени, поэтому отношение  $L/r$  называется постоянной времени и обозначается  $\tau$ :

$$\tau = L/r \quad [\tau] = \left[ \frac{L}{r} \right] = \frac{\text{ом} \cdot \text{сек}}{\text{ом}} = \text{сек}.$$

Время, прошедшее от начала замыкания цепи до появления установившегося тока, теоретически продолжается бесконечно долго. Однако практически это время принимают равным

$$t = (4 \div 5) \tau.$$

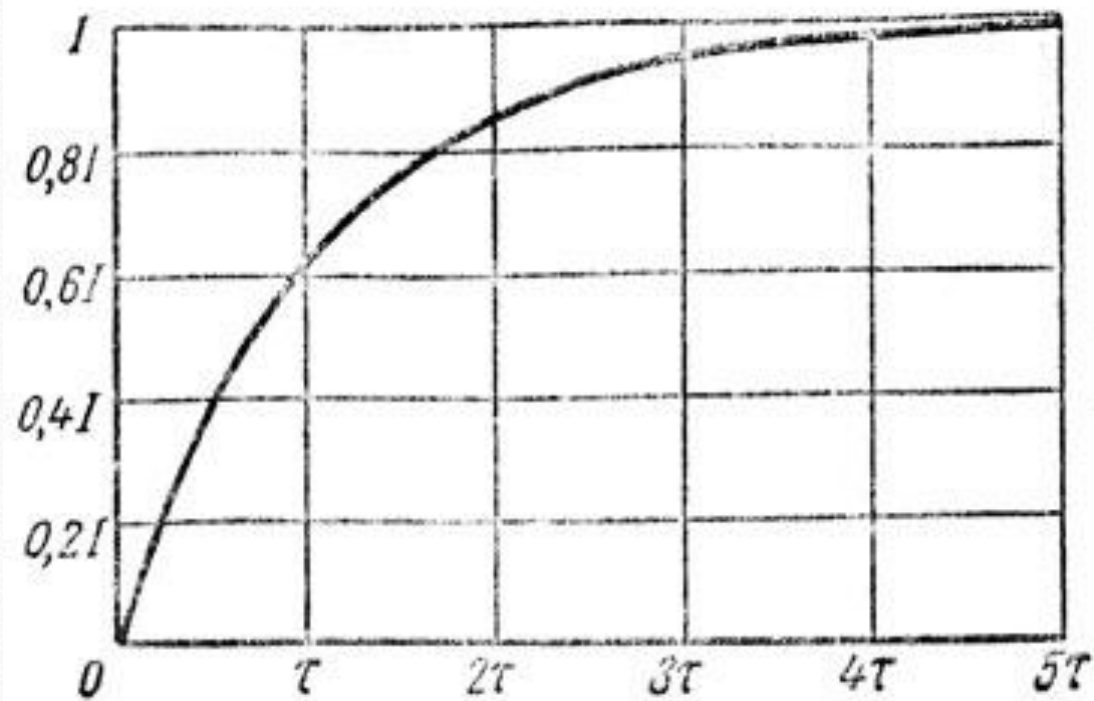
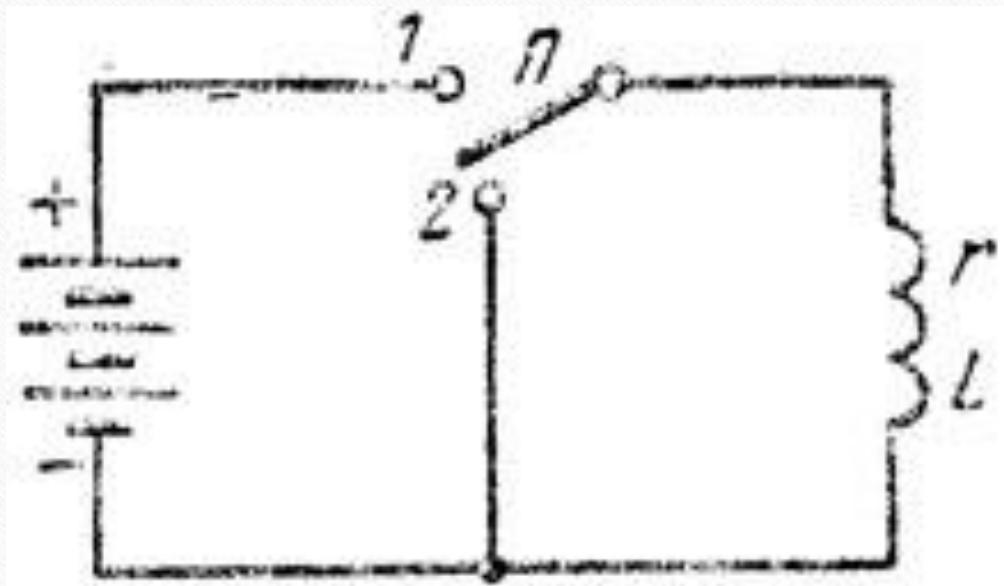


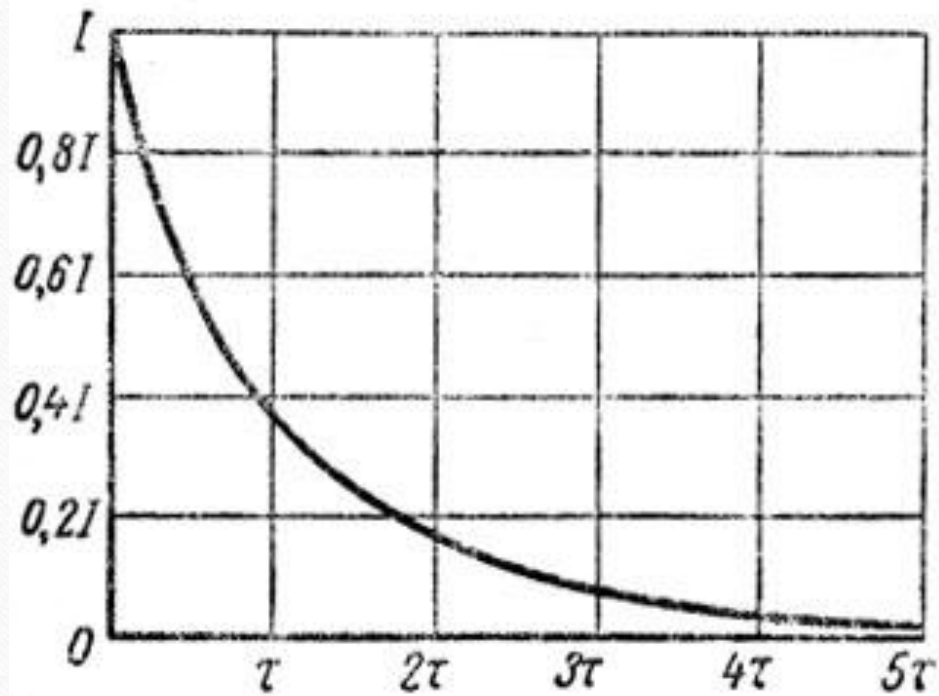
График изменения тока при включении катушки на постоянное напряжение показан на рис. . Если цепь обладает малой индуктивностью, то  $L/r$  мало и ток в цепи устанавливается почти мгновенно.



Вернемся снова к схеме, показанной на рис. . Поставим переключатель П в положение 2. При этом катушка окажется замкнутой накоротко. Как показывает опыт, в катушке некоторое время будет протекать ток. В первый момент времени ток в катушке будет равен току, который проходил в катушке до отключения. Затем ток уменьшается быстро, а затем все медленнее и медленнее.

Чем же объяснить, что в катушке, отключенной от источника э.д.с., некоторое время будет проходить ток? Это объясняется тем, что при исчезновении тока в цепи магнитное поле катушки будет исчезать. В катушке возникнет э.д.с. самоиндукции. Имея то же направление, что и исчезающий ток, э.д.с. самоиндукции будет поддерживать в короткозамкнутом участке ток прежнего направления.





Ток в любой момент времени будет определяться величиной самоиндукции и сопротивлением участка:

$$\dot{i} = \frac{e}{L_{\Gamma}} = - \frac{L_{\Gamma}}{r} \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Скорость исчезновения тока в цепи в этом случае будет определяться постоянной времени

$$\tau = \frac{L}{r}$$

Теоретически ток в короткозамкнутом участке будет протекать бесконечно долгое время. Практически считают, что ток в короткозамкнутом участке становится разным нулю за время

$$t = (4 \div 5) \tau.$$

График изменения тока при отключении катушки от источника э.д.с. и замыкании ее накоротко показан на рис.

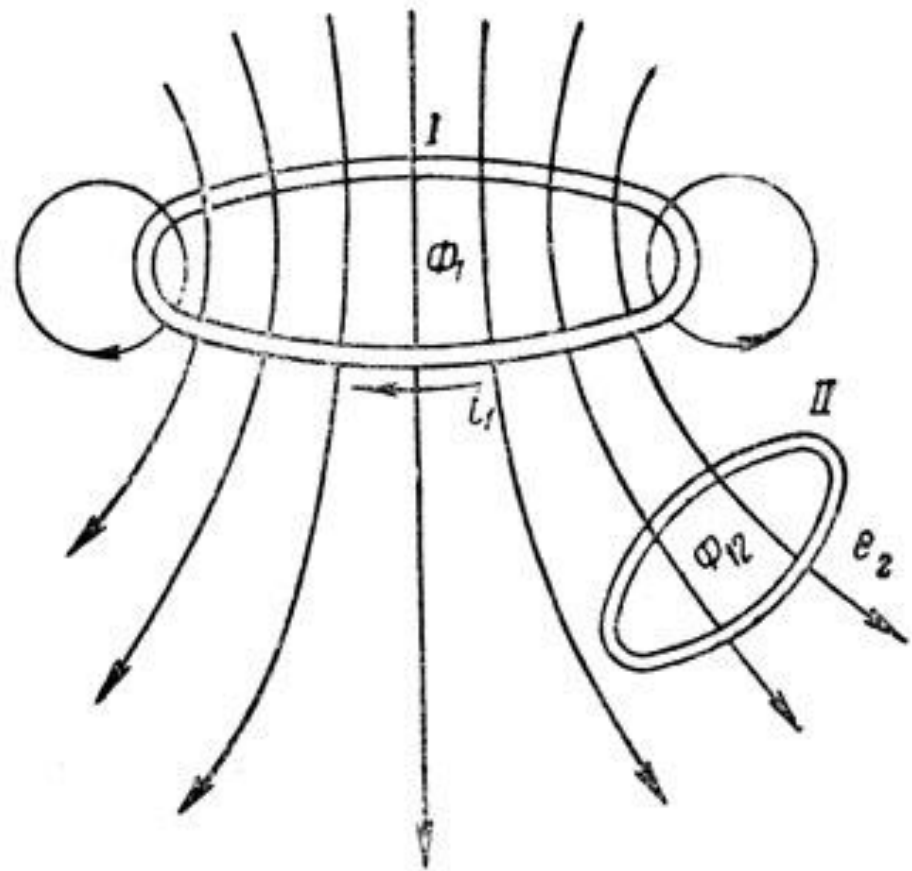
Ток, протекающий некоторое время в короткозамкнутом участке, показывает нам, что на это время катушка превратилась в генератор электрической энергии с э.д.с., равной э.д.с. самоиндукции. Следовательно, магнитное поле обладало запасом энергии. За время протекания тока магнитная энергия превращается в тепло (в сопротивлении катушки  $r$ ).

Магнитная энергия может быть определена по формуле

$$W_{\text{м}} = LI^2/2 \text{ Дж.}$$

При включении катушки к источнику с постоянной э.д.с. часть энергии, поступающей от источника, расходуется на нагрев обмотки катушки, а другая часть энергии источника идет на образование магнитного поля катушки.

# Взаимоиנדукция



Взаимоиндукцией называется влияние изменяющегося магнитного поля одного проводника на другой проводник, в результате чего во втором проводнике возникает индуцированная э.д.с. Пусть мы имеем два проводника I и II (рис. ) или две катушки, или два контура. Ток в первом проводнике  $i_1$  создается источником напряжения (на чертеже не показан). Ток  $i_1$  образует магнитный поток  $\Phi_1$ , одна часть которого  $\Phi_{12}$  пересекает второй проводник, а другая часть  $\Phi_{11}$  замыкается помимо второго проводника:

$$\Phi_1 = \Phi_{12} + \Phi_{11}$$

Если вместо проводников мы возьмем две катушки с числом витков  $w_1$  и  $w_2$  (рис, а), то потокосцепление второго контура будет

$$\Psi_{12} = w_2 \Phi_{12}.$$

Так как поток  $\Phi_{12}$  пропорционален току  $i_1$ , то зависимость между потокосцеплением  $\Psi_{12}$  и током  $i_1$  будет

$$\Psi_{12} = w_2 \Phi_{12}.$$

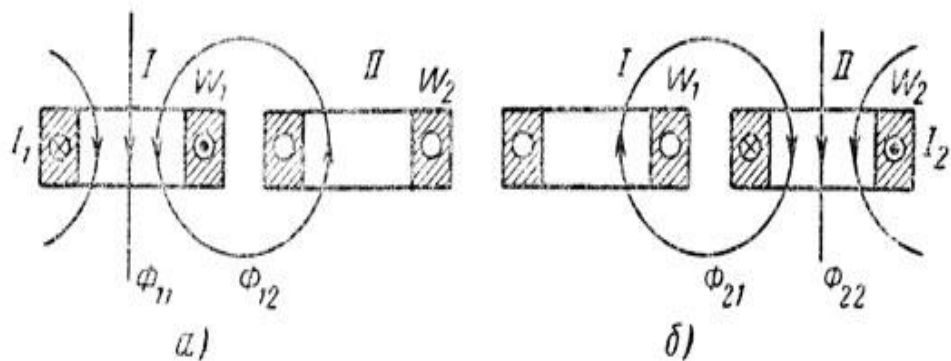
откуда

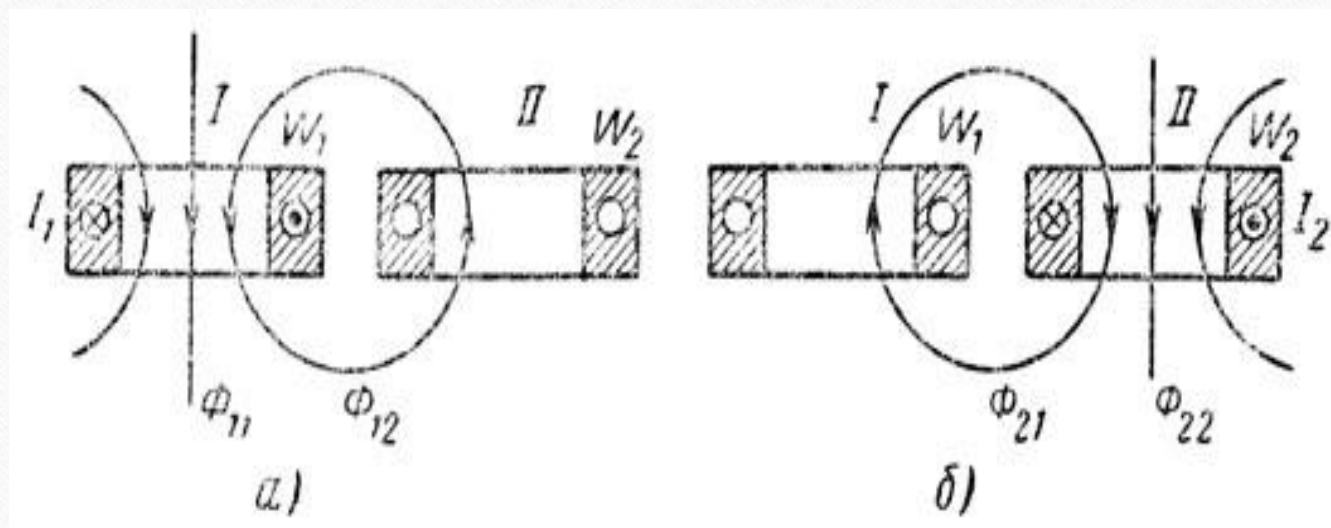
$$M_{12} = \Psi_{12} / i_1 = w_2 \Phi_{12} / i_1,$$

где  $M_{12}$  - коэффициент пропорциональности, называемый взаимной индуктивностью двух катушек (или контуров).

Взаимная индуктивность  $M$  измеряется в тех же единицах, что и индуктивность  $L$ , т. е. в генри (Гн).

Взаимная индуктивность зависит от числа витков катушек, их размера, взаимного расположения катушек и магнитной проницаемости среды, в которой находятся катушки.





Если пропустить ток  $i_2$  по второму проводнику (рис. б), то по аналогии можно написать:

$$\Psi_{21} = w_1 \Phi_{21}$$

и

$$\Psi_{21} = M_{21} i_2,$$

откуда

$$M_{21} = \Psi_{21} / i_2 = w_1 \Phi_{21} / i_2.$$

Опыты и расчеты показывают, что  $M_{12} = M_{21} = M$ .

Следовательно, взаимная индуктивность двух индуктивно или магнитно связанных цепей не зависит от того, какой цепью будет создаваться магнитный поток.

При изменении тока  $i_1$  в первом контуре магнитные потоки  $\Phi_{11}$  и  $\Phi_{12}$  будут изменяться; во втором контуре возникнет индуцированная э.д.с., величина которой

$$e_{M2} = - \frac{\Delta \Psi_{12}}{\Delta t} = - w_2 \frac{\Delta \Phi_{12}}{\Delta t} = - M \frac{\Delta i_1}{\Delta t}.$$

Аналогично, при изменении тока  $i_2$  во втором контуре в первом контуре возникнет э.д.с.

$$e_{M1} = -\frac{\Delta\Psi_{21}}{\Delta t} = -w_1\frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta t} = -M\frac{\Delta i_2}{\Delta t}.$$

Эти э.д.с. называются **э.д.с. взаимной индукции**.



Пусть мы имеем два индуктивно связанных контура, причем первый контур обладает сопротивлением  $r_1$  и индуктивностью  $L_1$ , а второй контур -  $r_2$  и  $L_2$ .

Если к контурам соответственно подать напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , то напряжение  $U_1$ , приложенное к первому контуру, должно уравновесить э.д.с. самоиндукции и взаимоиндукции, а также падение напряжения в сопротивлении  $r_1$  контура:

$$U_1 = L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t} + M \frac{\Delta i_2}{\Delta t} + i_1 r_1,$$

Для второго контура

$$U_2 = L_2 \frac{\Delta i_2}{\Delta t} + M \frac{\Delta i_1}{\Delta t} + i_2 r_2.$$

Между индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$  контуров и взаимной индуктивностью  $M$  существует следующая зависимость:

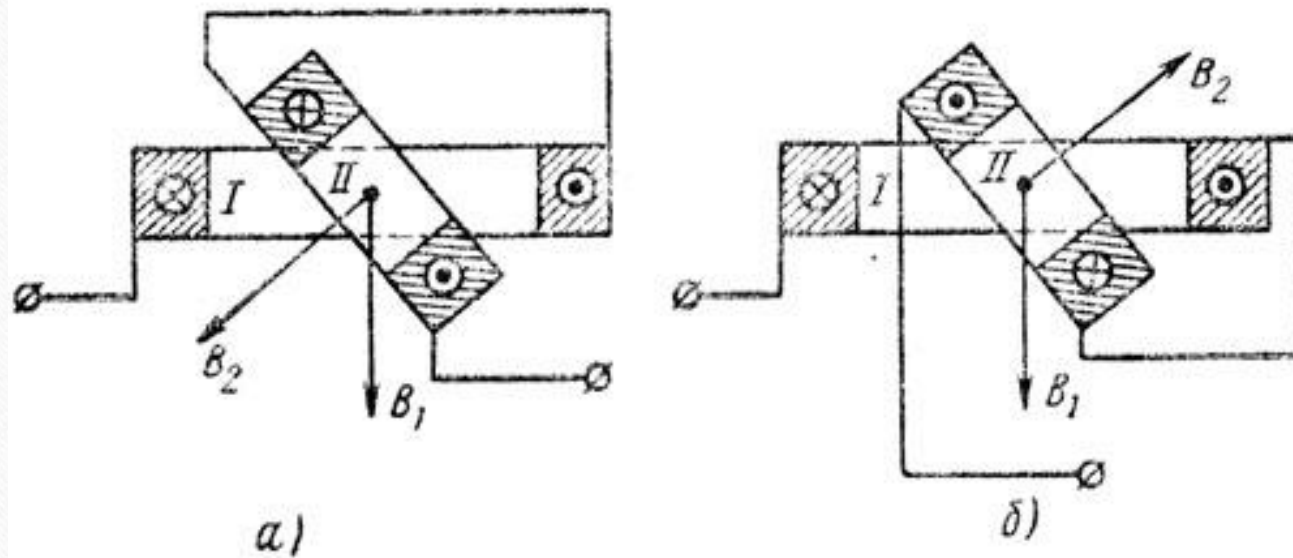
$$M = \sqrt{L_1 L_2}.$$

Однако эта формула верна, когда весь поток, создаваемый первым контуром, сцепляется с витками второго контура. На практике  $M$  меньше  $\sqrt{L_1 L_2}$ , т. е.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}; k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.$$

Величина  $k$  меньше единицы и называется коэффициентом связи катушек. Этот коэффициент равнялся бы единице в том случае, если бы  $\Phi_{12} = \Phi_1$  и  $\Phi_{21} = \Phi_2$ .

Электромагнитная связь между двумя контурами может быть изменена, если сближать контуры или удалять их один от другого, а также если менять взаимное расположение контуров.



В радиотехнике применяют приборы, работающие по принципу взаимной индукции и служащие для плавного изменения индуктивности цепи. Такие приборы называются вариометрами. Они состоят из двух последовательно соединенных катушек, одна из которых может вращаться внутри другой (рис. ).

Пусть обе катушки расположены так, чтобы оси их вращения совпадали и магнитные поля катушки были направлены одинаково (согласное включение). В этом случае

$$U = i (r_1 + r_2) + L_1 \frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2 \frac{\Delta i}{\Delta t} + 2M \frac{\Delta i}{\Delta t} = i (r_1 + r_2) + \frac{\Delta i}{\Delta t} (L_1 + L_2 + 2M) = ir + L' \frac{\Delta i}{\Delta t},$$

где индуктивность системы из двух индуктивно связанных катушек

$$L' = L_1 + L_2 + 2M.$$

Если повернуть внутреннюю катушку на  $180^\circ$ , то в этом случае магнитные потоки катушек будут направлены навстречу один другому (встречное включение).

В этом случае

$$U = i (r_1 + r_2) + L_1 \frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2 \frac{\Delta i}{\Delta t} - 2M \frac{\Delta i}{\Delta t} = ir + L'' \frac{\Delta i}{\Delta t},$$

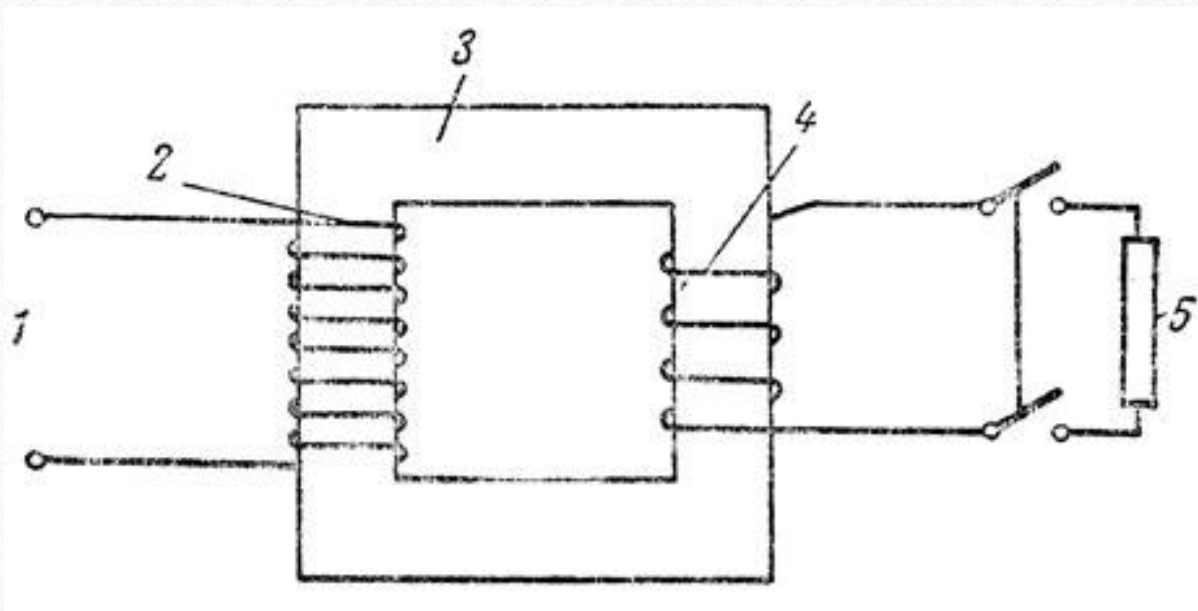
где

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M.$$

Вращая катушку между первым и вторым положением, мы можем менять индуктивность системы в пределах от  $L'$  до  $L''$ .

В определенных случаях взаимная индукция нежелательна: например, две линии связи (телефон) оказывают взаимное влияние, мешая работе одна другой. Линии передачи электрической энергии, расположенные параллельно и вблизи линии связи, индуктируют в последней токи, вызывающие шум и треск, мешающие их работе.

На явлении взаимоиндукции основаны устройство и работа трансформаторов.



*Схема устройства трансформатора: 1 - сеть переменного тока, 2 - первичная обмотка, 3 - сердечник, 4 - вторичная обмотка, 5 - потребитель*

Трансформатором называется аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения, но той же частоты (рис.).

Устройство трансформатора следующее. На сердечнике, собранном из пластин электротехнической стали, намотаны две обмотки. Обмотка, к которой подводится напряжение, называется первичной. Ток, проходя по первичной обмотке, создает магнитное поле, линии которого замыкаются по сердечнику. Обмотка, в которой будет наводиться э.д.с. взаимоиндукции, используемая далее во внешней цепи, называется вторичной обмоткой.

Если первичную обмотку трансформатора питать переменным током, т. е. током, изменяющимся по величине и направлению, то во вторичной обмотке будет индуцироваться переменная э.д.с. Если ко вторичной обмотке подключить нагрузку (лампы накаливания, двигатели), то во вторичной цепи будет протекать переменный ток.

Отсюда видно, что работа трансформатора основана на использовании явления взаимной индукции.



### Задачи для самостоятельного решения

1. В равномерном магнитном поле, индукция которого равна  $6000$  гс, перемещается проводник под углом  $30^\circ$  к направлению поля. Длина проводника  $50$  см. Скорость движения его  $2,5$  м/сек. Определить величину индуцированной э.д.с.
2. Определить величину индуцированной э.д.с. в проводнике предыдущей задачи, если проводник перемещается перпендикулярно направлению магнитного поля.
3. Магнитный поток  $0,6 \cdot 10^6$  мкс, пронизывающий катушку, состоящую из  $200$  витков, равномерно уменьшается до нуля за  $0,05$  сек. Определить величину э.д.с., индуцированной в катушке.
4. В катушке за  $0,01$  сек ток равномерно изменился на  $200$  а. Определить величину э.д.с. самоиндукции, если индуктивность катушки  $0,05$  гн.
5. Определить индуктивность катушки, состоящей из  $100$  витков, если при равномерном изменении тока на  $20$  а магнитный поток изменился за то же время на  $0,6$  вб.
6. Определить индуктивность цилиндрической катушки, которая имеет длину  $20$  см, диаметр  $5$  см и число витков  $200$ .