

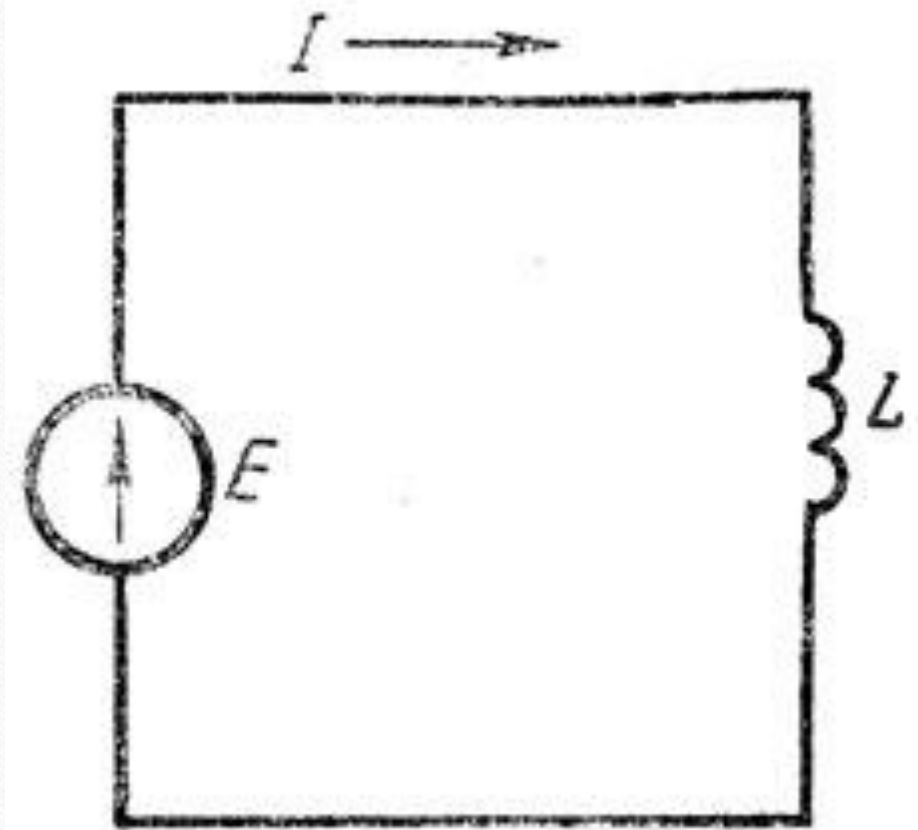
**Цепь переменного  
тока с  
ИНДУКТИВНОСТЬЮ**

Как мы видели выше, при включении, выключении и при всяком изменении тока в электрической цепи вследствие пересечения проводника своим же собственным магнитным полем в нем возникает индуцированная э.д.с. Эту э.д.с. мы называли э.д.с. самоиндукции. Э.д.с. самоиндукции, как указывалось, имеет реактивный характер.

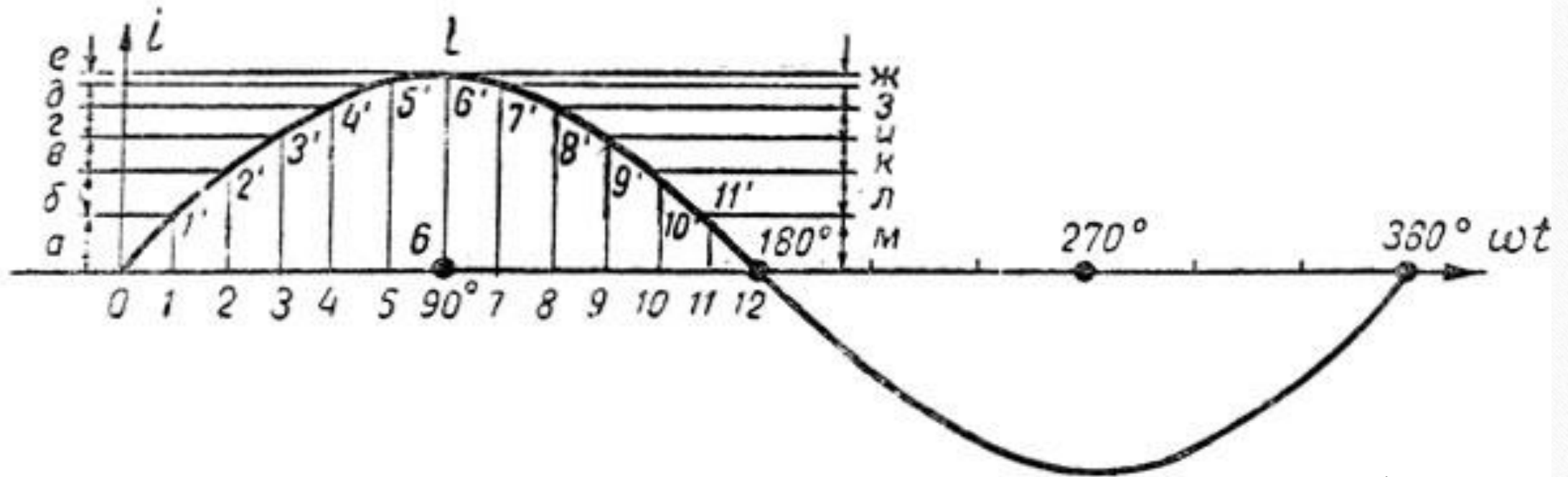
Как нам уже известно, э.д.с. самоиндукции зависит от скорости изменения тока в цепи и от индуктивности этой цепи (числа витков, наличия стальных сердечников):

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

В цепи переменного тока э.д.с.  
самоиндукции возникает и действует  
непрерывно, так как ток в цепи непрерывно  
изменяется.



На рис. представлена схема цепи переменного тока, содержащей катушку с индуктивностью  $L$  без стального сердечника. Для простоты будем считать сначала, что активное сопротивление катушки  $r$  очень мало и им можно пренебречь.



За промежуток времени 0-1 величина тока изменилась от нуля до 1-1'.

Прирост величины тока за это время равен а.

За время, обозначенное отрезком 1-2, мгновенная величина тока выросла до 2-2', причем прирост величины тока равен б.

В течение времени, обозначенного отрезком 2-3, ток увеличивается до 3-3', прирост тока показывает отрезок в и т. д.

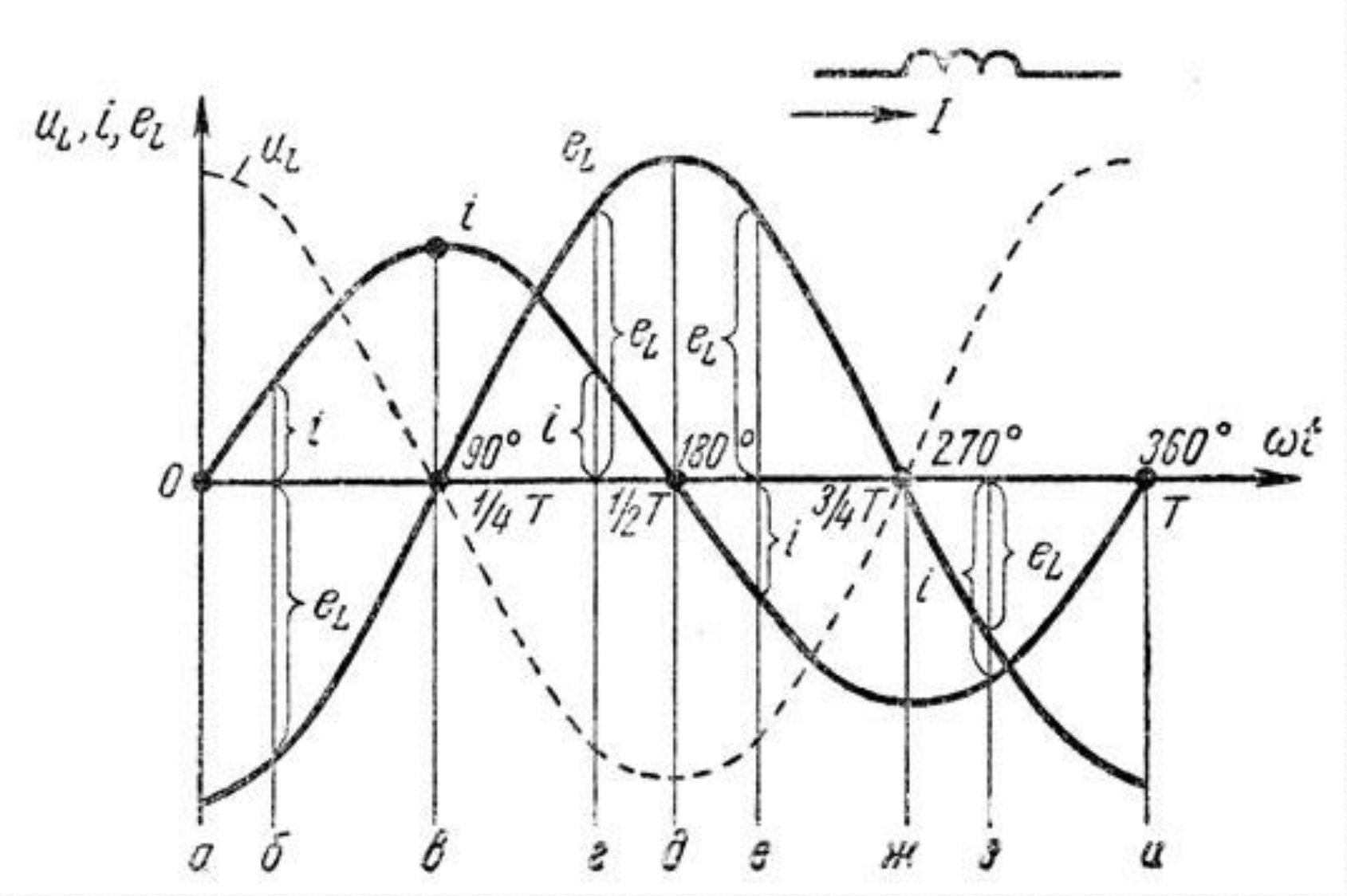
Так, с течением времени переменный ток возрастает до максимума (при  $90^\circ$ ). Но, как видно из чертежа, прирост тока делается все меньше и меньше, пока, наконец, при максимальном значении тока этот прирост не станет равным нулю.

При дальнейшем изменении тока от максимума до нуля убыль величины тока становится все больше и больше, пока, наконец, около нулевого значения ток, изменяясь с наибольшей скоростью, не исчезнет, но тут же появляется вновь, протекая в обратном направлении.



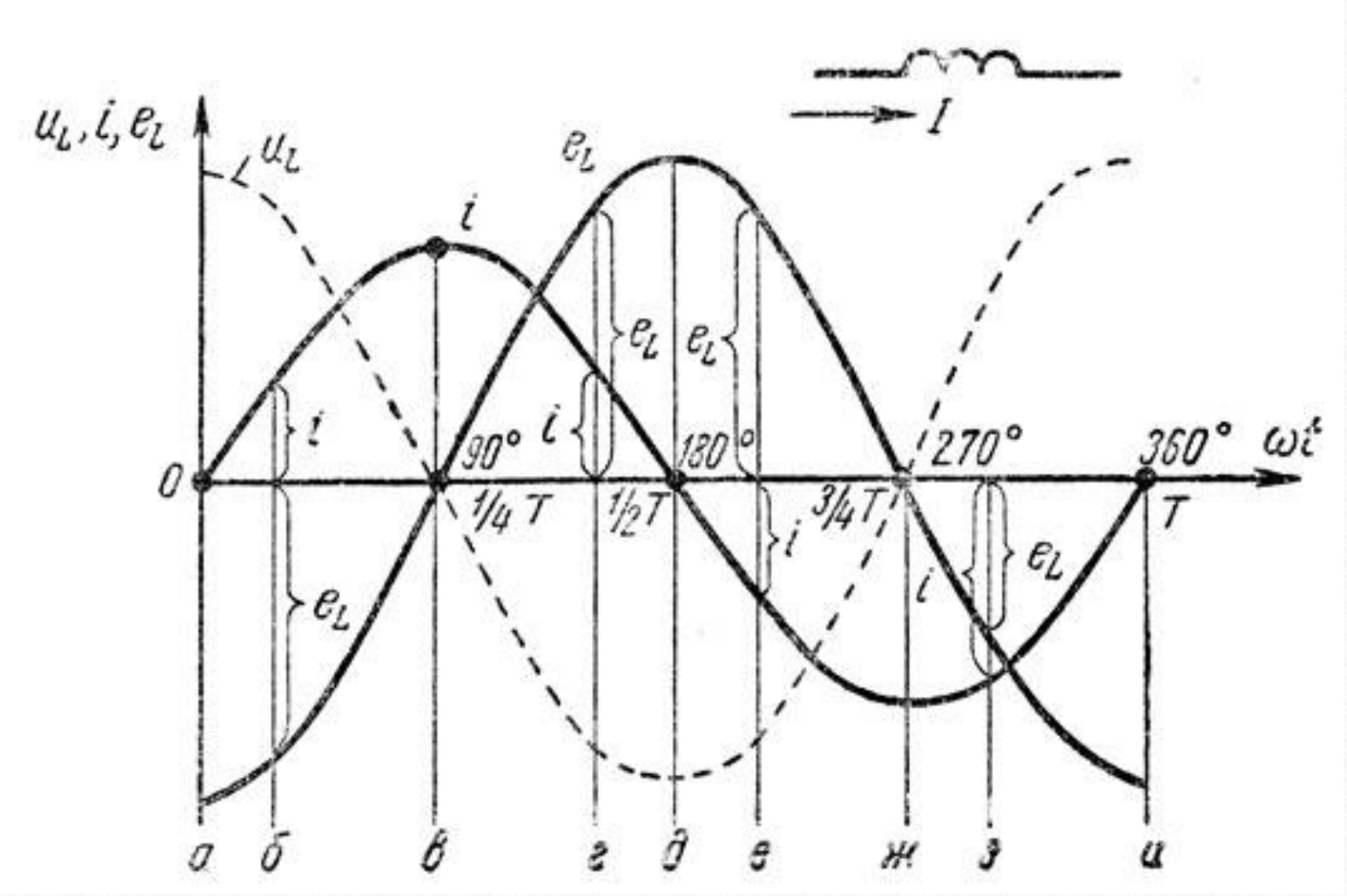
Рассматривая изменение тока в течение периода, мы видим, что с наибольшей скоростью изменяется ток около своих нулевых значений. Около максимальных значений скорость изменения тока падает, а при максимальном значении тока прирост его равен нулю. Таким образом, переменный ток меняется не только по величине и направлению, но также и по скорости своего изменения.

Переменный ток, проходя по виткам катушки, создает переменное магнитное поле. Магнитные линии этого поля, пересекая витки своей же катушки, индуктируют в них э.д.с. самоиндукции.

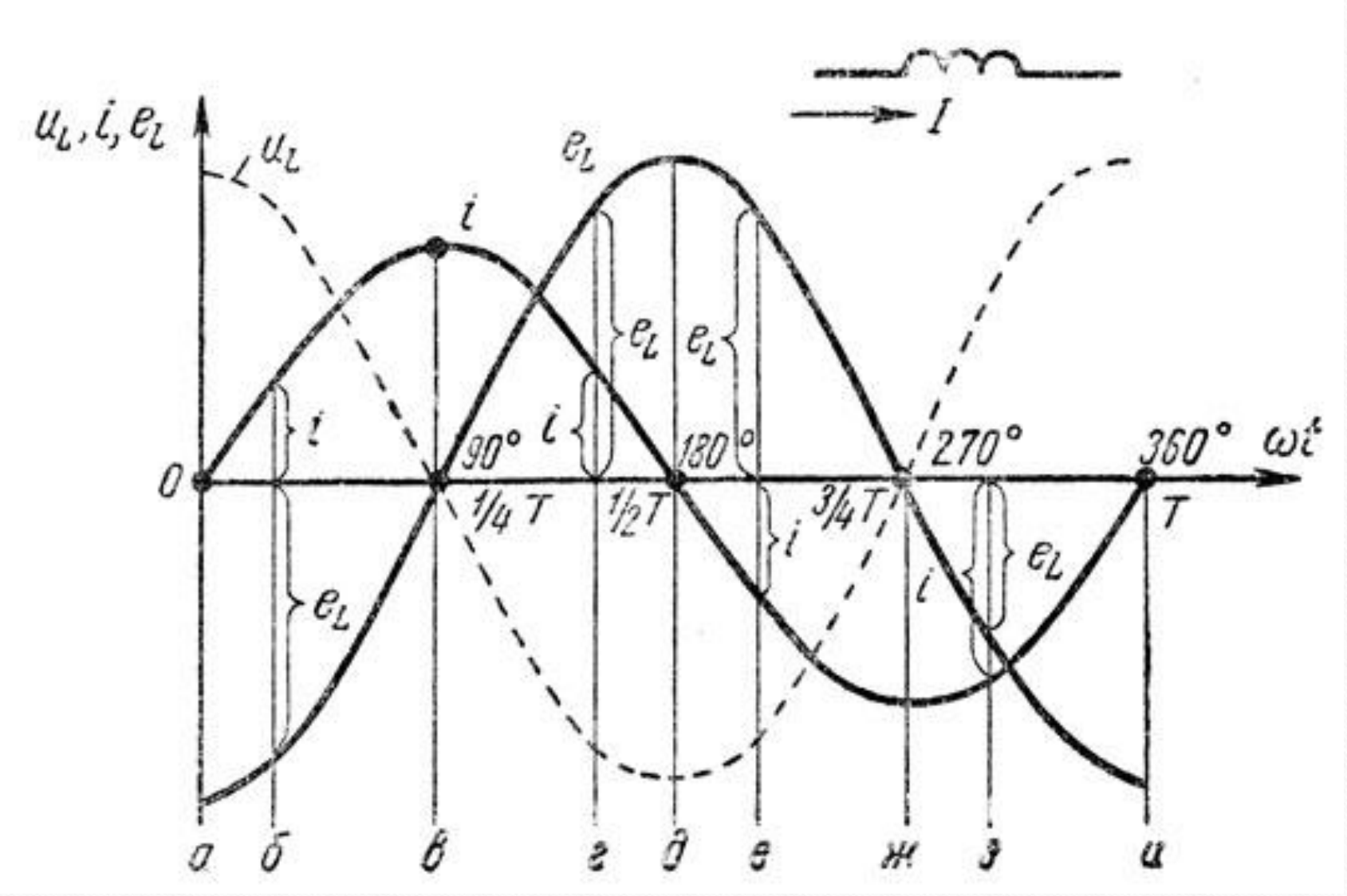


Выше было показано, что наибольшая скорость изменения тока имеет место около нулевых значений тока. Следовательно, наибольшее значение э.д.с. самоиндукции имеет в те же моменты.

В момент  $a$  ток резко и быстро увеличивается от нуля, а поэтому, как следует из вышеприведенной формулы, э.д.с. самоиндукции (кривая  $e_L$ ) имеет отрицательное максимальное значение. Так как ток увеличивается, то э.д.с. самоиндукции, по правилу Ленца, должна препятствовать изменению (здесь увеличению) тока.

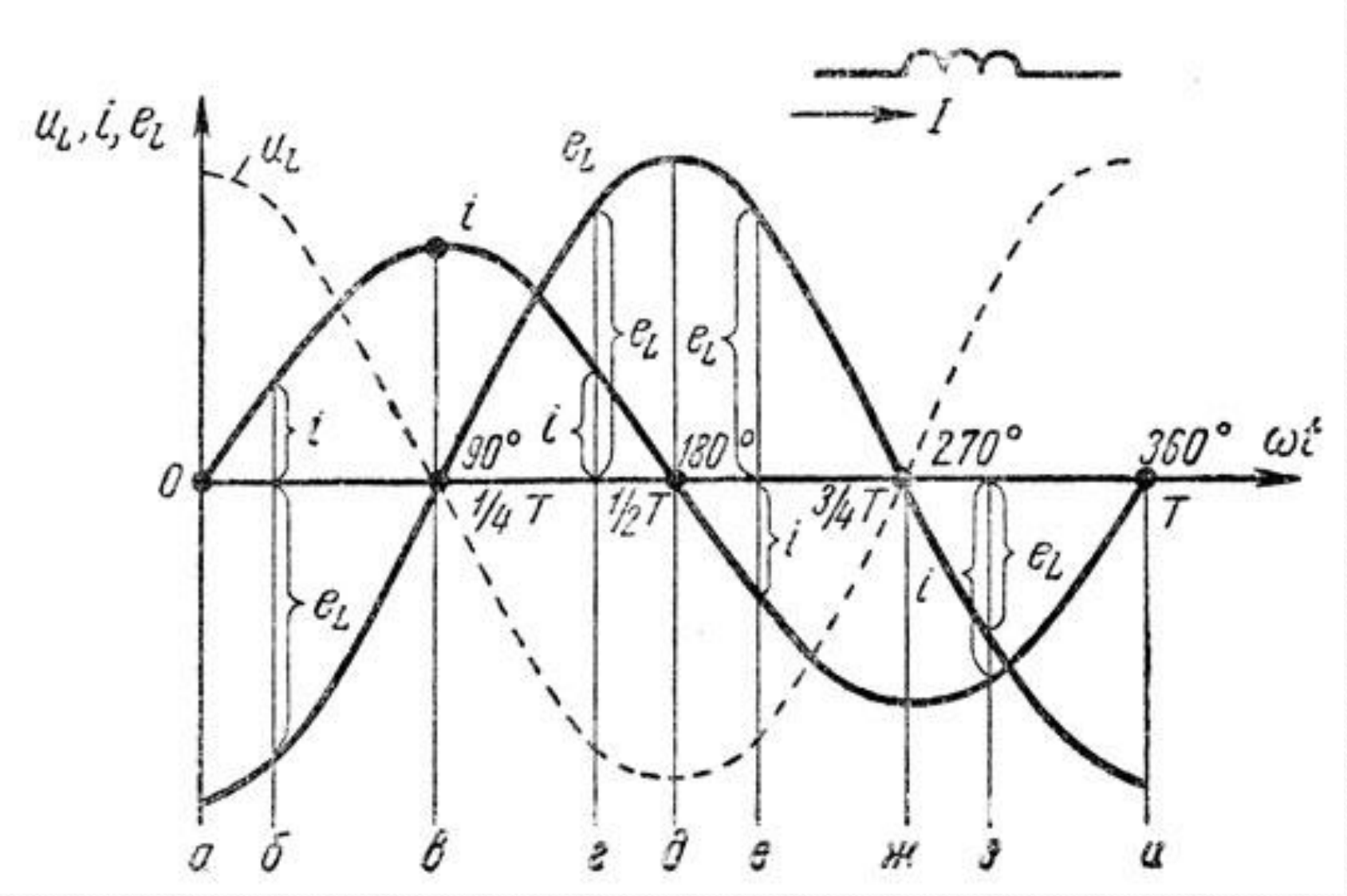


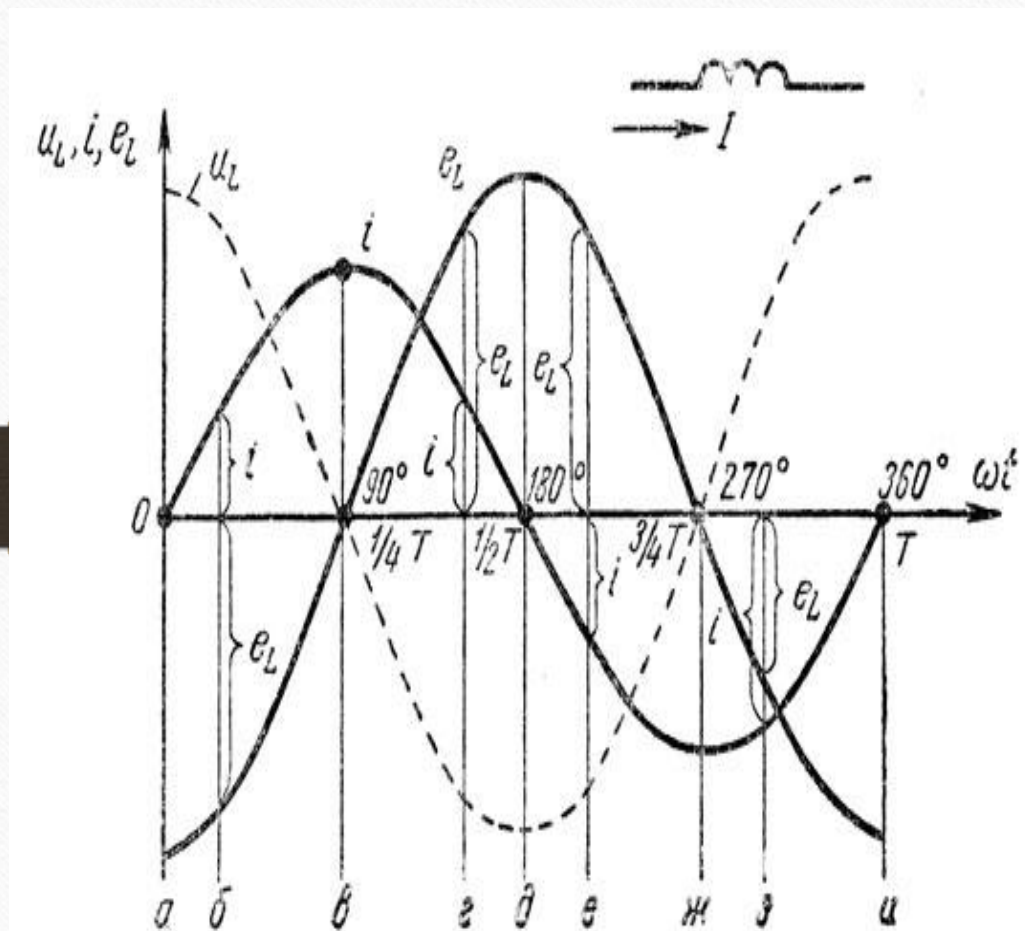
Переменный ток, достигнув максимума, начинает убывать. По правилу Ленца, э.д.с. самоиндукции препятствует току убывать и, направленная уже в сторону протекания тока, будет его поддерживать (положение г).



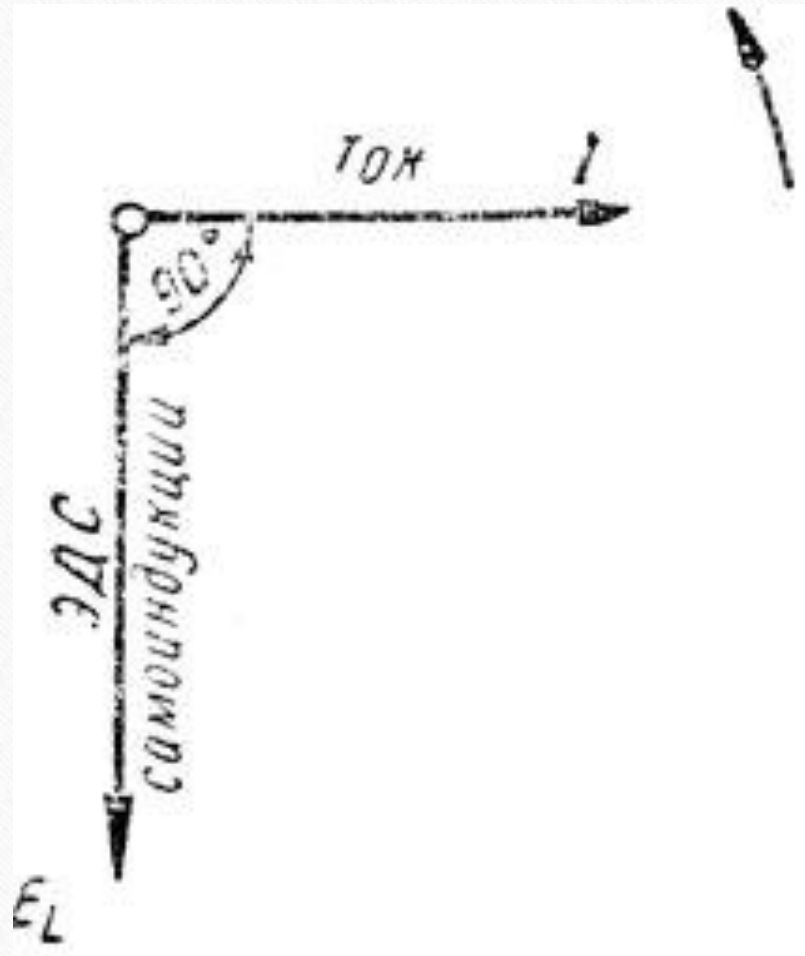


Во вторую половину периода изменения тока картина повторяется и снова при возрастании тока Э.Д.С. самоиндукции будет препятствовать ему, имея направление, обратное току (положение е).

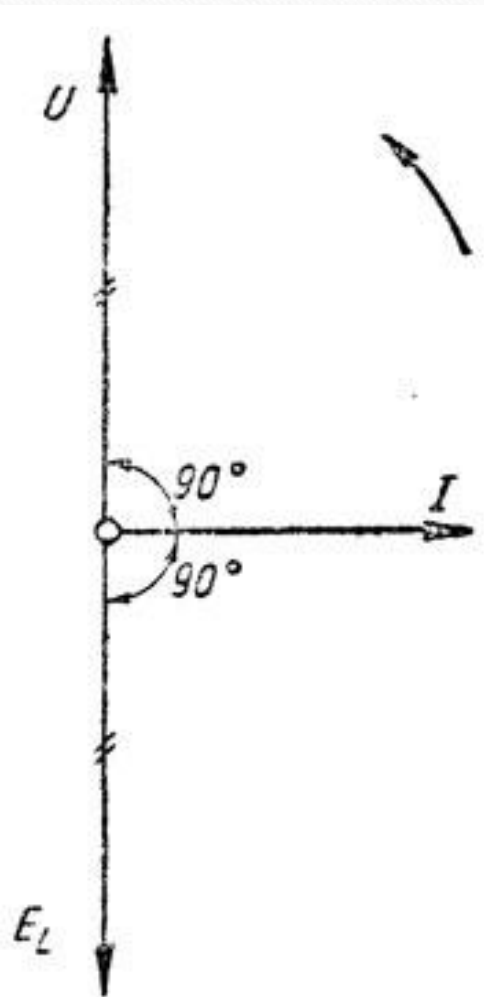




На рисунке видно, что э.д.с. самоиндукции отстает по фазе от тока на  $90^\circ$ , или на  $1/4$  периода. Так как магнитный поток совпадает по фазе с током, то можно сказать, что э.д.с., наводимая магнитным потоком, отстает от него по фазе на  $90^\circ$ , или на  $1/4$  периода.

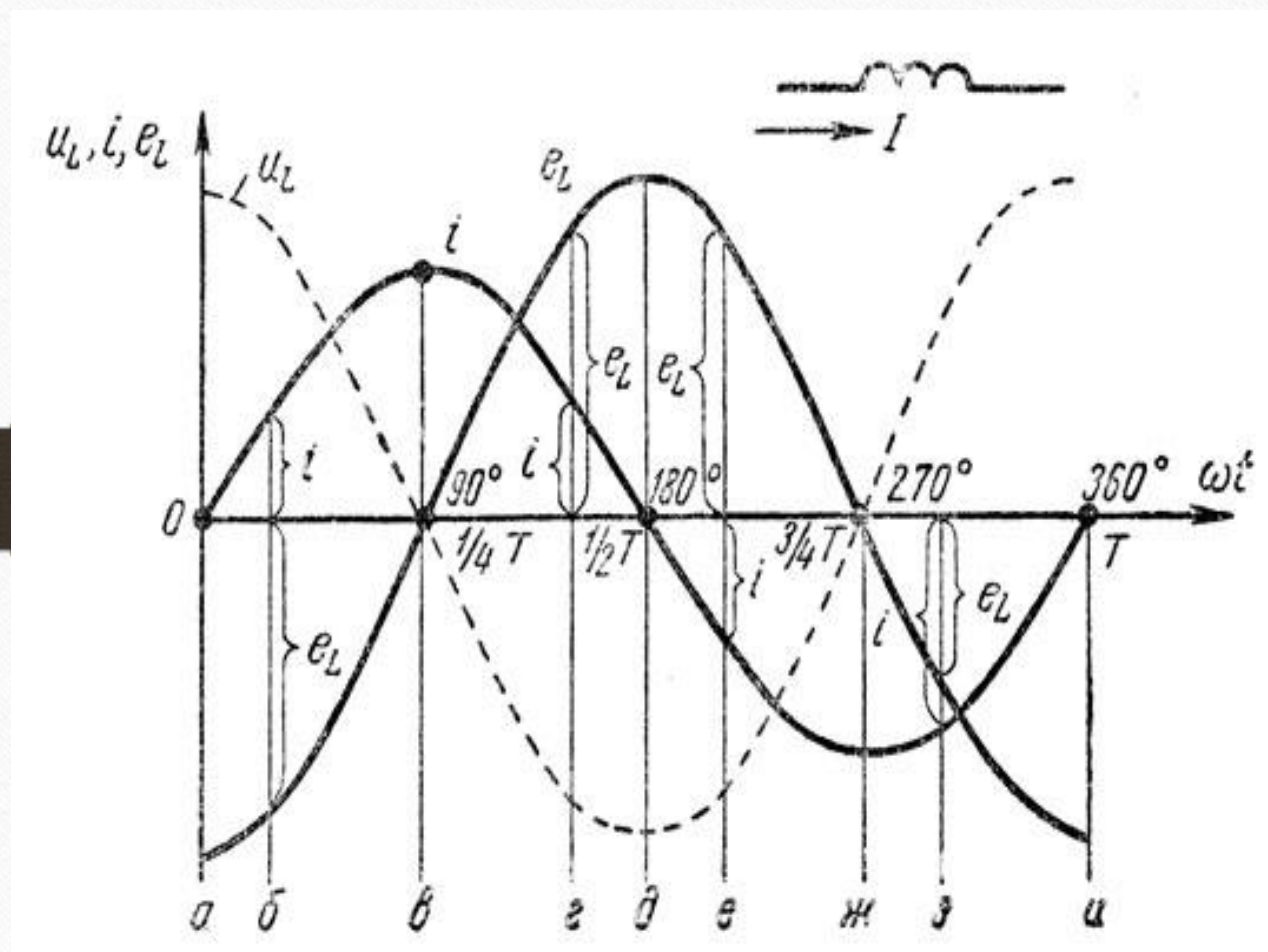


Нам уже известно, что две синусоиды, сдвинутые одна относительно другой на  $90^\circ$ , можно изобразить векторами, расположенными под углом  $90^\circ$



Так как э.д.с. самоиндукции в цепях переменного тока непрерывно противодействует изменениям тока, то, чтобы ток мог протекать по виткам катушки, напряжение сети должно уравновешивать э.д.с. самоиндукции.

Следовательно, в цепи с индуктивностью ток  $I$  отстает от приложенного напряжения  $U$  по фазе на  $1/4$  периода. На векторной диаграмме этому сдвигу фаз между напряжением  $U$  и током  $I$  соответствует угол  $\alpha = 90^\circ$  или  $\pi/2$ .



Таким образом, в цепях переменного тока Э.Д.С. самоиндукции, возникая и действуя непрерывно, вызывает сдвиг фаз между током и напряжением.

Итак отметим, что в цепи переменного тока, когда э.д.с. самоиндукции отсутствует, напряжение сети и ток совпадают по фазе.

Индуктивная же нагрузка в цепях переменного тока (обмотки электродвигателей и генераторов, обмотки трансформаторов, индуктивные катушки) всегда вызывает сдвиг фаз между током и напряжением.



Можно показать, что скорость изменения синусоидального тока пропорциональна угловой частоте  $\omega$ . Следовательно, действующее значение э.д. с. самоиндукции  $E_L$  может быть найдено по формуле

$$E_L = \omega LI = 2\pi fLI.$$

Как было отмечено выше, напряжение, приложенное к зажимам цепи, содержащей индуктивность, должно быть по величине равно э.д.с. самоиндукции:

$$U_L = E_L.$$

Поэтому

$$U_L = 2\pi fLI.$$

Обозначая

$$2\pi fL = x_L, \text{ получим } U_L = x_L I.$$

Формула закона Ома для цепи переменного тока, содержащей индуктивность, имеет вид

$$I = U_L / x_L.$$

Величина  $x_L$  называется индуктивным сопротивлением цепи, или реактивным сопротивлением индуктивности, и измеряется в омах.

Оно равно произведению  
индуктивности на угловую  
частоту:

$$x_L = \omega L = 2\pi fL.$$

Так как индуктивное сопротивление проводника зависит от частоты переменного тока, то сопротивление катушки, включаемой в цепь токов различной частоты, будет различным. Например, если имеется катушка с индуктивностью  $0,05$  гн, то в цепи тока частотой  $50$  гц ее индуктивное сопротивление будет

а в цепи тока частотой 400 Гц

$$x_{L2} = 2\pi f_2 L = 2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 0,05$$
$$=$$

Та часть напряжения сети, которая преодолевает (уравновешивает) э.д.с. самоиндукции, называется индуктивным падением напряжения (или реактивной составляющей напряжения):

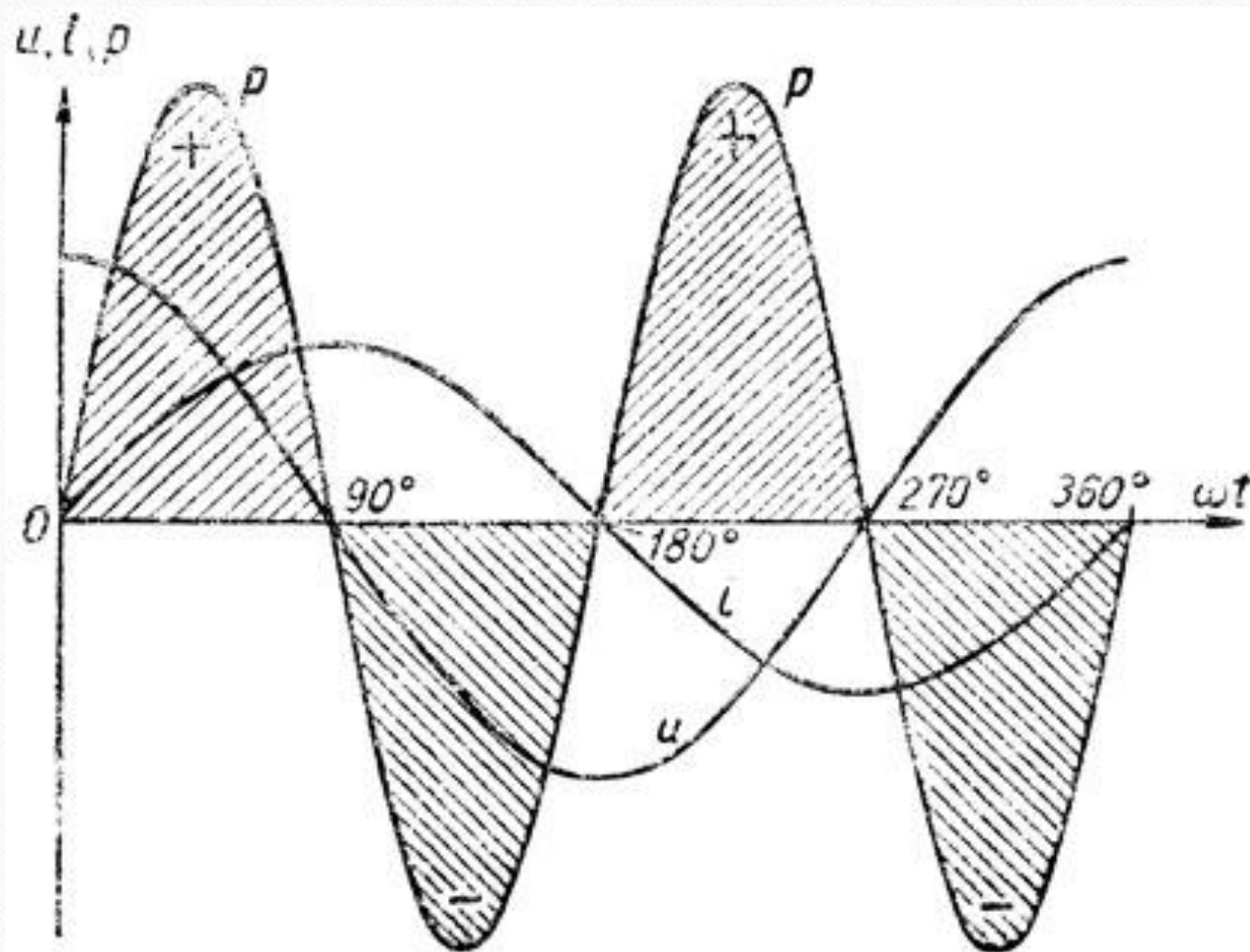
$$U_L = x_L I.$$



Рассмотрим теперь, какая мощность потребляется от источника переменного напряжения, если к зажимам его подключена индуктивность.

На рис. даны кривые мгновенных значений напряжения, тока и мощности для этого случая.

Мгновенное значение мощности равно произведению мгновенных значений напряжения и тока:  $p = u i$ .

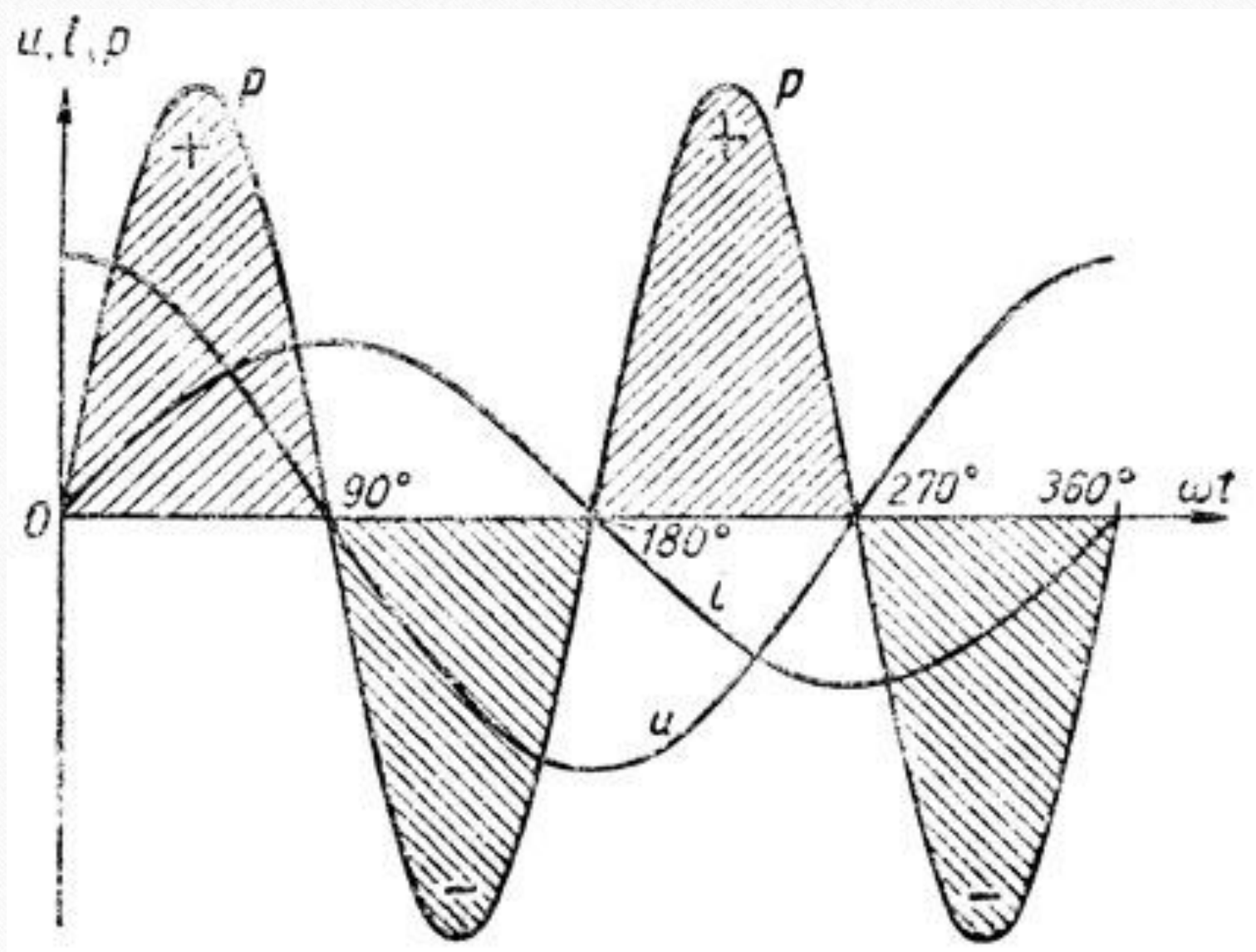


Из чертежа видно, что если  $u$  и  $i$  имеют одинаковые знаки, то кривая  $p$  располагается выше оси  $\omega t$ . Если же  $u$  и  $i$  имеют разные знаки, то кривая  $p$  располагается ниже оси  $\omega t$ .

В первую четверть периода ток, а вместе с ним и магнитный поток катушки увеличиваются. Катушка потребляет из сети мощность. Площадь, заключенная между кривой  $p$  и осью  $\omega t$ , есть работа (энергия) электрического тока. В первую четверть периода энергия, потребляемая из сети, идет на создание магнитного поля вокруг витков катушки (мощность положительная). Количество энергии, запасаемое в магнитном поле за время увеличения тока, можно определить по формуле  $W = \frac{LI^2}{2}$ .

Количество энергии,  
запасаемое в магнитном поле  
за время увеличения тока,  
можно определить по  
формуле

$$W = \frac{L I^2}{2}$$



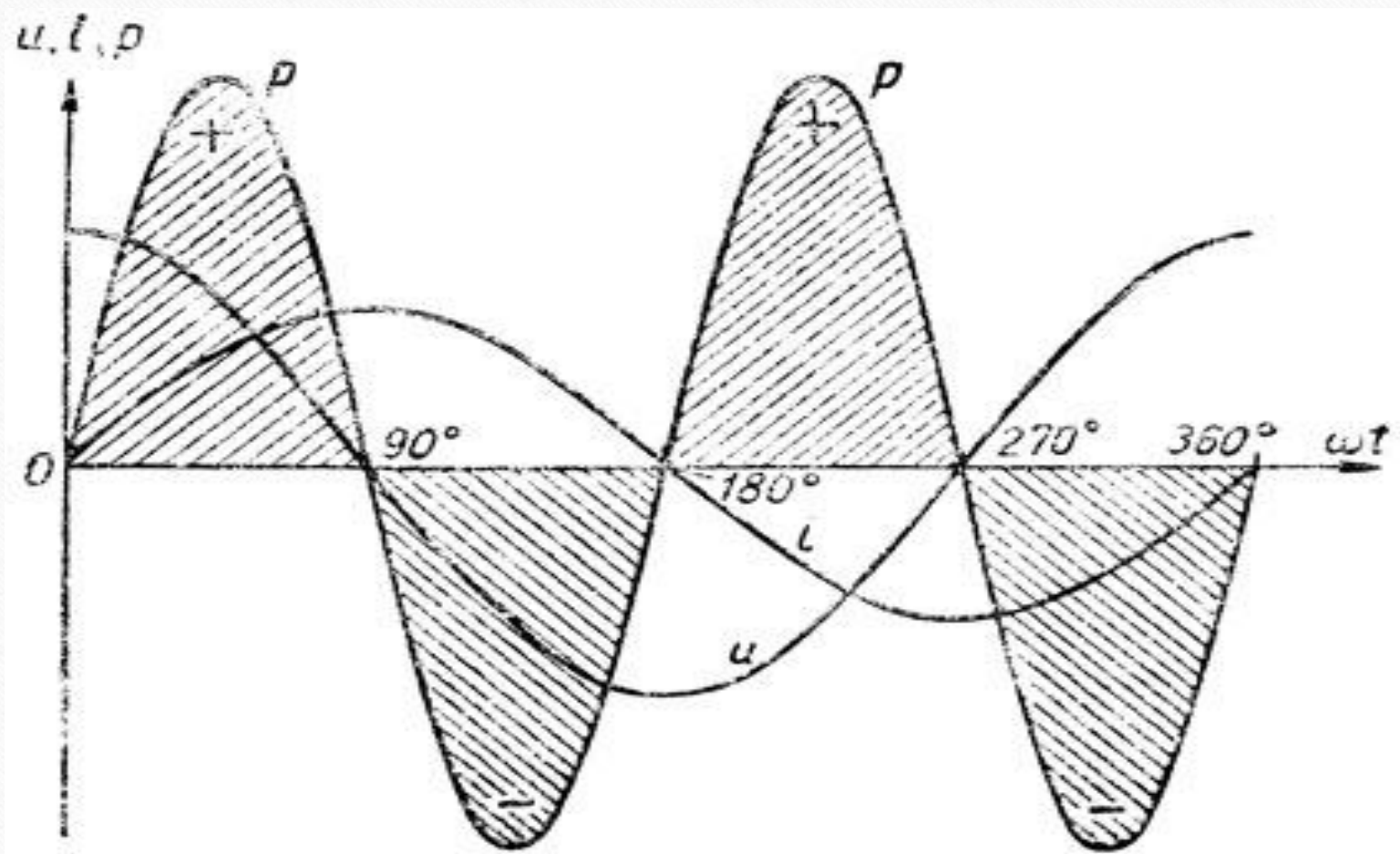
Во вторую четверть периода ток убывает. э.д.с. самоиндукции, которая в первую четверть периода стремилась препятствовать возрастанию тока, теперь, когда ток начинает уменьшаться, будет препятствовать ему уменьшаться. Сама катушка становится как бы генератором электрической энергии. Она возвращает в сеть энергию, запасенную в ее магнитном поле. Мощность отрицательна, и на рис. 142 кривая  $p$  располагается ниже оси  $\omega t$ .

Во вторую половину периода явление повторяется. Таким образом, между источником переменного напряжения и катушкой, содержащей индуктивность, происходит обмен мощностью. В течение первой и третьей четвертей периода мощность поглощается катушкой, в течение второй и четвертой четвертей мощность возвращается источнику.

В этом случае в среднем расхода энергии не будет, несмотря на то что на зажимах цепи есть напряжение  $U$  и в цепи протекает ток  $I$ .

Следовательно, средняя, или активная, мощность цепи, носящей чисто индуктивный характер, равна нулю.





Из графика, изображенного на рис. 142, видно, что мгновенная мощность цепи с индуктивностью два раза в течение каждого периода (когда  $\omega t = 45^\circ, 135^\circ$  и т. д.) достигает максимального значения, равного  $U_M / \sqrt{2} \cdot I_M / \sqrt{2} = UI$ . Этой величиной принято характеризовать количественно процесс обмена энергией между источником и магнитным полем. Ее называют реактивной мощностью и обозначают буквой  $Q$ .

Учитывая, что в  
рассматриваемой цепи  $U = I \cdot$   
 $x_L$ , получаем следующее  
выражение для реактивной  
мощности:

$$Q = I^2 x_L.$$