# *Лекция 7*. **Реле переменного тока. Реле выдержки времени.**

7.1. Реле переменного тока (ДСШ)
7.2. Реле выдержки времени

У индукционного реле тяговое усилие, перемещающее подвижную часть (алюминиевый сектор) и связанные с ней подвижные контактные пружины, возникает в результате взаимодействия переменного **магнитного потока** одного электромагнита и **токов**, индуктируемых в алюминиевом секторе (откуда и название – индукционные) переменным магнитным потоком другого электромагнита. Этим индукционные реле принципиально отличаются от электромагнитных реле, у которых тяговое усилие на подвижную часть (якорь) является результатом **магнитного** взаимодействия (притяжения) якоря и сердечника.

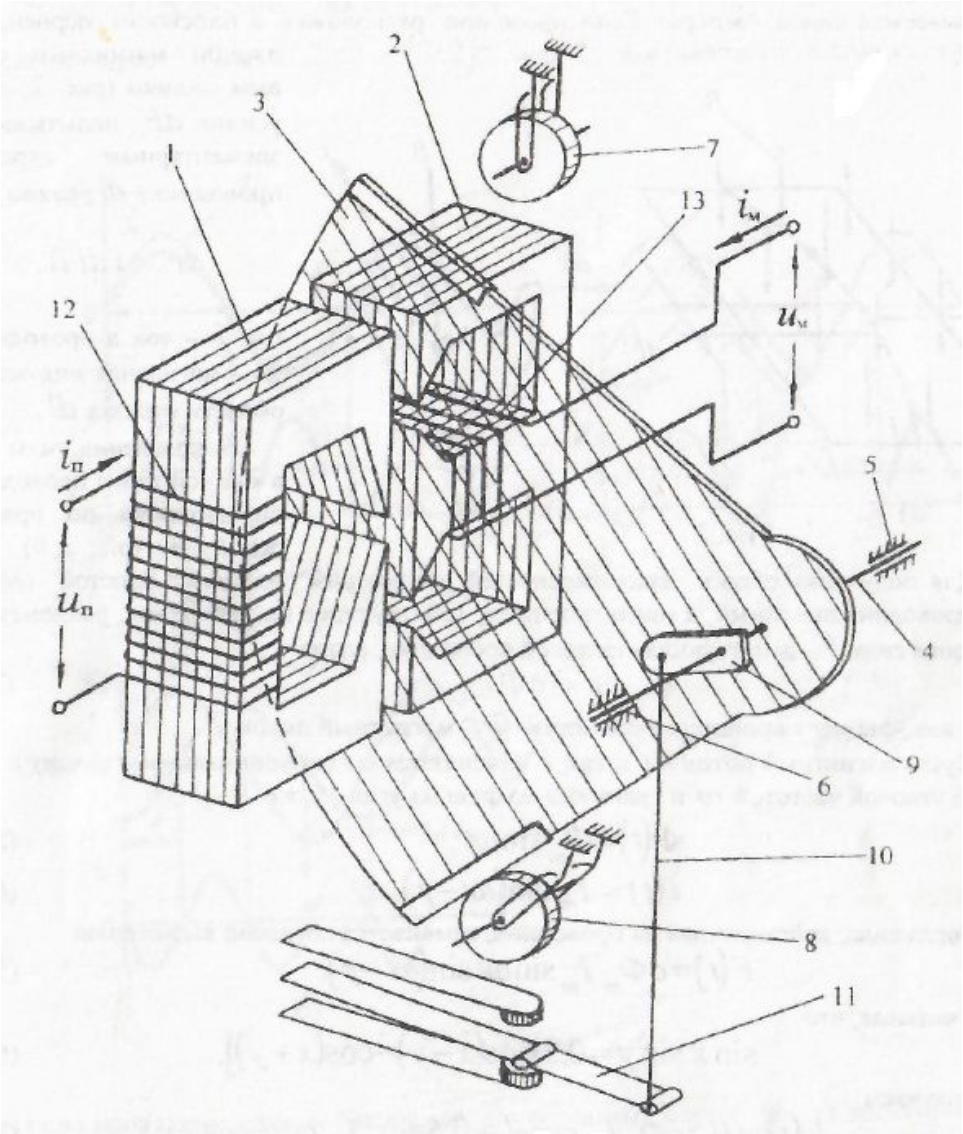


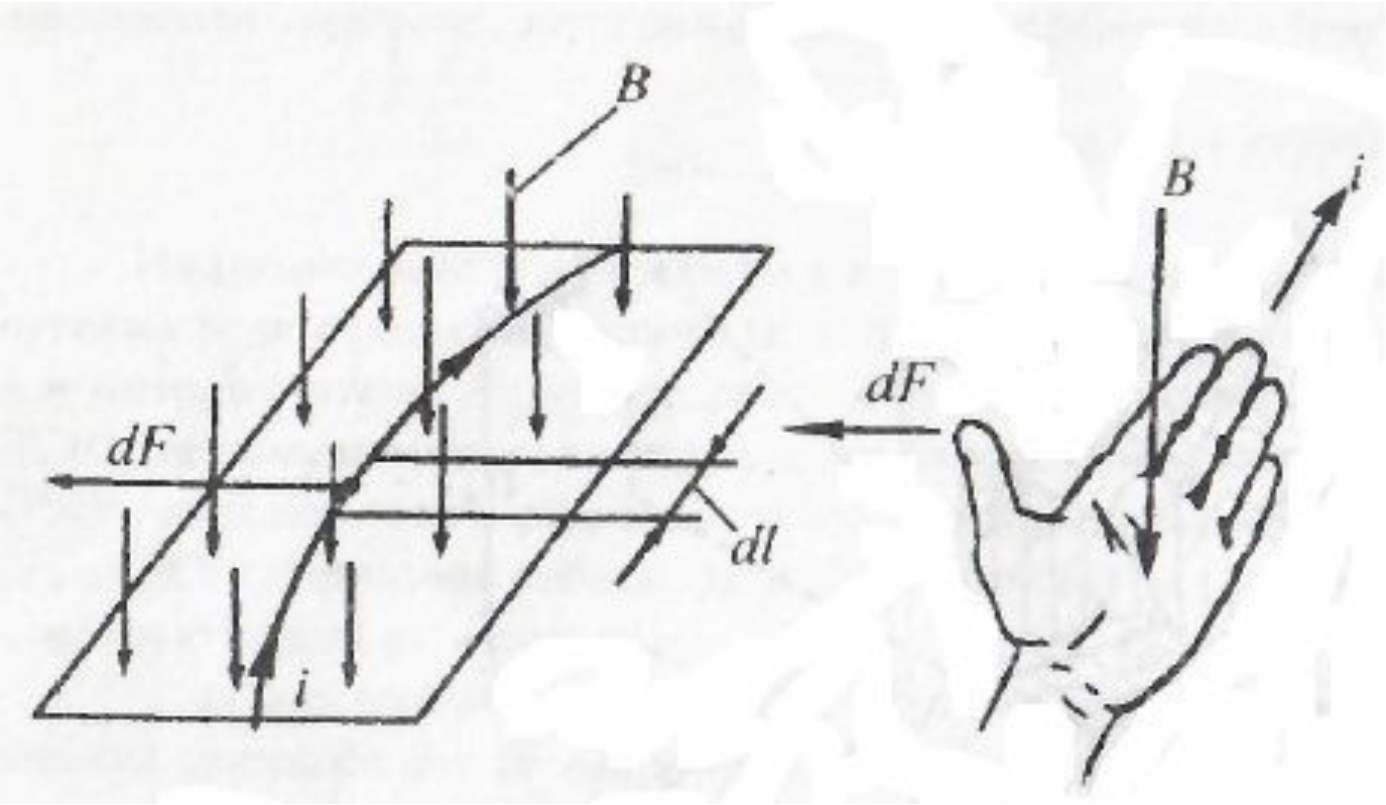

Рис. 7.1. Упрощенная конструкция реле типа ДСШ

На проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует механическая сила (называемая силой Ампера). Если проводник расположен в плоскости, перпендикулярной магнитным силовым линиям (рис. 7.2, а), то усилие $dF$, испытываемое элементарным отрезком проводника $dl$, равно

(7.1)

где $i$ – ток в проводнике, $B$ – магнитная индукция в области отрезка $dl$.

Направление силы $dF$ в каждой точке проводника определяется по правилу левой руки (рис. 7.2, б).




а) б)

Рис. 7.2. Действие силы Ампера (а) и правило левой руки (б)

Для полученных общих закономерностей рассмотрим наиболее простой случай, когда проводник линейный, а магнитное поле, действующее на проводник, равномерное. Суммарная сила $F$, действующая на такой проводник, равна

(7.2)

где $c$ – коэффициент пропорциональности, $\Phi$ – магнитный поток.

Пусть магнитный поток $\Phi$ и ток $i$ изменяются по синусоидальному закону с одинаковой угловой частотой $\omega$ и сдвинуты по фазе на угол $\gamma$, т.е.

(7.3)

(7.4)

Тогда сила, действующая на проводник, изменяется согласно выражению

(7.5)

Учитывая,
что

(7.6)

из (7.5) получаем

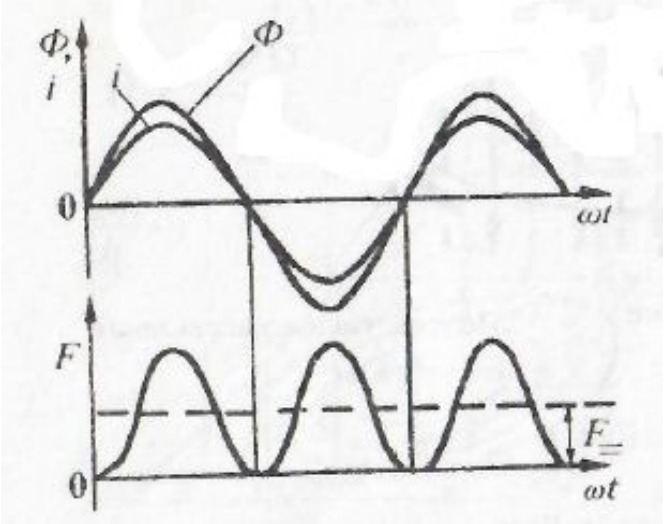
(7.7)

Из выражения (7.7) видно, что сила $F(t)$ содержит постоянную составляющую

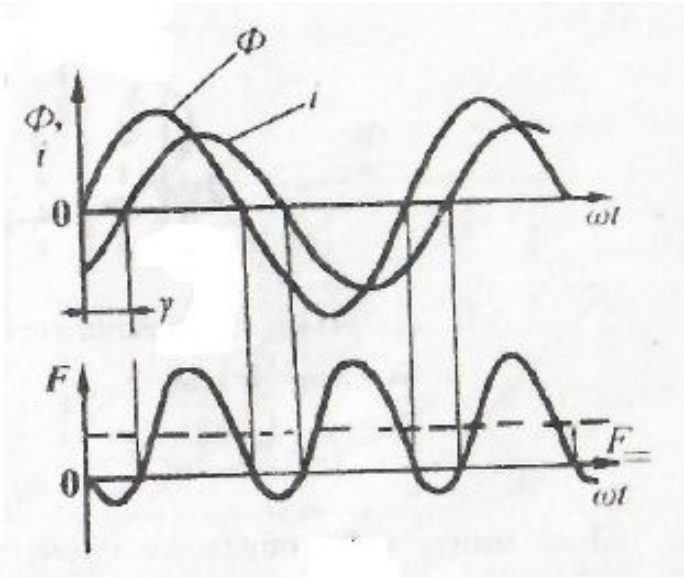
(7.8)

и переменную составляющую

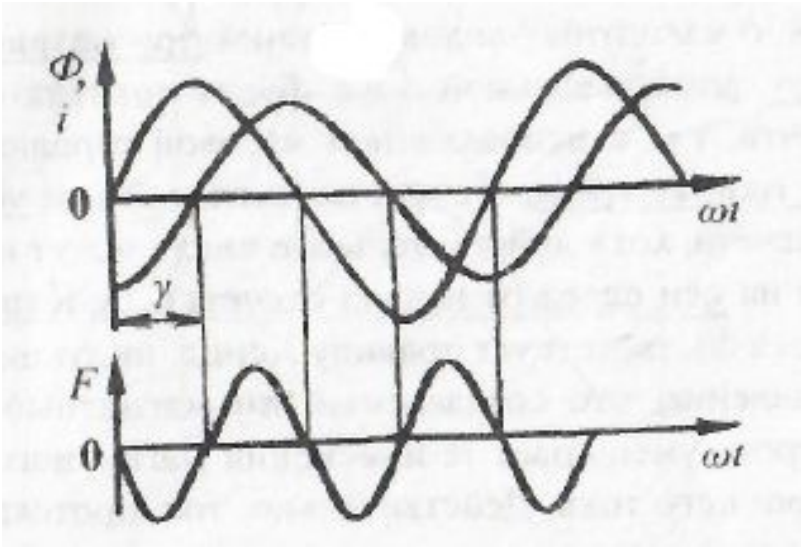
изменяющуюся с двойной частотой.




а) $\gamma = 0$




б) $\gamma = \pi/4$



Переменный ток в алюминиевом секторе создается переменным магнитным потоком. Согласно закону электромагнитной индукции, при всяком изменении магнитного потока $\Phi$, пронизывающего какой-либо контур (рис. 7.4), независимо от того, чем вызвано изменение потока, в контуре наводится ЭДС

(7.9)

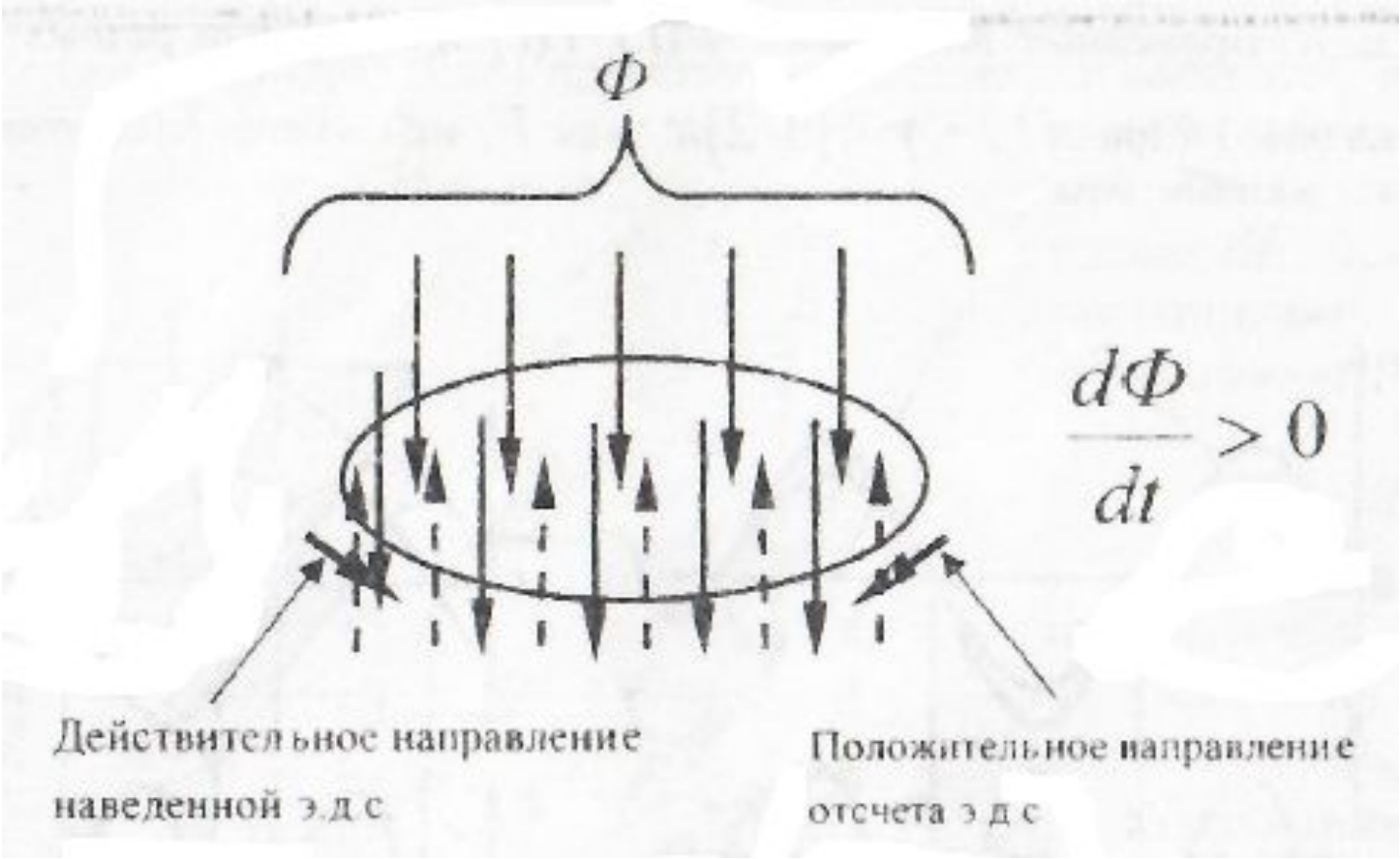
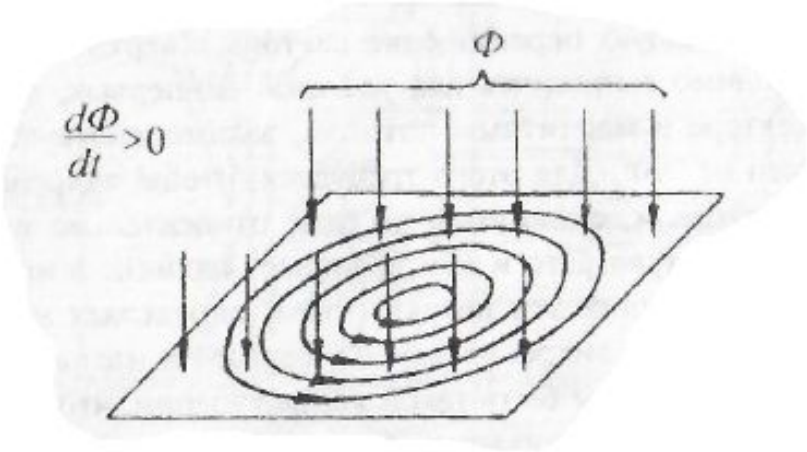


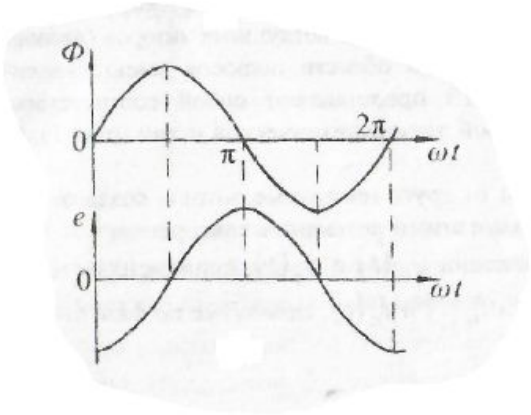

Рис. 7.4. Иллюстрация закона электромагнитной индукции

**Действительное** направление ЭДС и вызванного ей тока соответствует правилу Ленца: индукционный ток в контуре имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток сквозь поверхность, ограниченную контуром, уменьшает те изменения магнитного потока, которые вызваны появлением индукционного тока. Действительно, ток, протекающий в направлении ЭДС (против часовой стрелки) создает внутри контура магнитный поток, направленный встречно магнитному потоку $\Phi$ и препятствующий его возрастанию (показан на рис. 7.4 пунктиром).

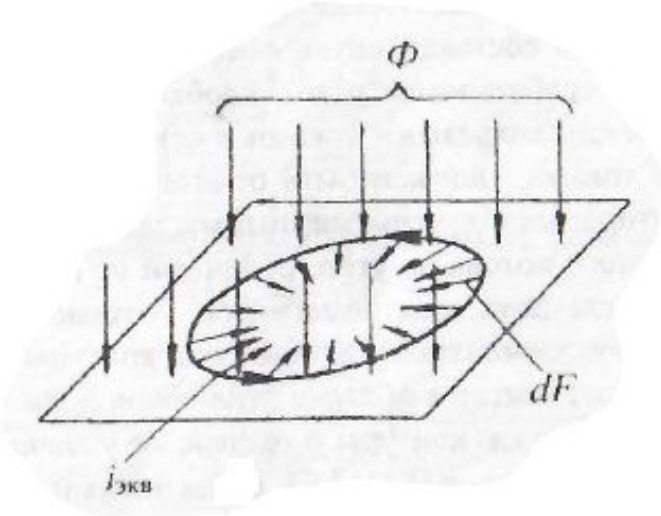
Если переменный магнитный поток пронизывает тонкий лист из электропроводящего материала (алюминиевый сектор), то наведенная ЭДС и соответствующие токи (называемые вихревыми токами) распределяются по сектору в виде окружностей (рис. 7.5, а). Каждый элемент (тор) сектора можно рассматривать как замкнутый контур, направление тока в этом контуре также определяется по приведенному выше правилу.




а)




б)




в)

Рис. 7.5. Распределение наведенной ЭДС по сектору (а), отставание ЭДС от магнитного потока (б), эквивалентный виток (в)

Есл
и

(7.10)

то с учетом действительного направления ЭДС для каждого контура тока имеем

(7.11)

т.е. ЭДС в каждом контуре тока изменяется по синусоидальному закону с угловой частой $\omega$ и отстает по фазе от магнитного потока $\Phi(t)$ на угол $\pi/2$ (рис. 7.5, б).

Если пренебречь индуктивностью каждого контура, т.е. считать сопротивление контура чисто активным и равным $r$, то ток в контуре равен

(7.12)

Алюминиевый сектор в области действия магнитного потока $\Phi$ можно рассматривать как некий эквивалентный виток, по которому протекает ток $i_{\text{экв}}(t)$, равный сумме токов всех рассматриваемых контуров (рис. 7.5, в). Поскольку все эти токи по фазе совпадают, то с учетом (7.12)

(7.13)

где $K$ – коэффициент пропорциональности.

Чтобы механические силы, действующие на сектор, имели достаточно большую постоянную составляющую, обеспечивающую перемещение сектора в верхнее положение (т.е. срабатывание реле), необходимо выполнить два условия:

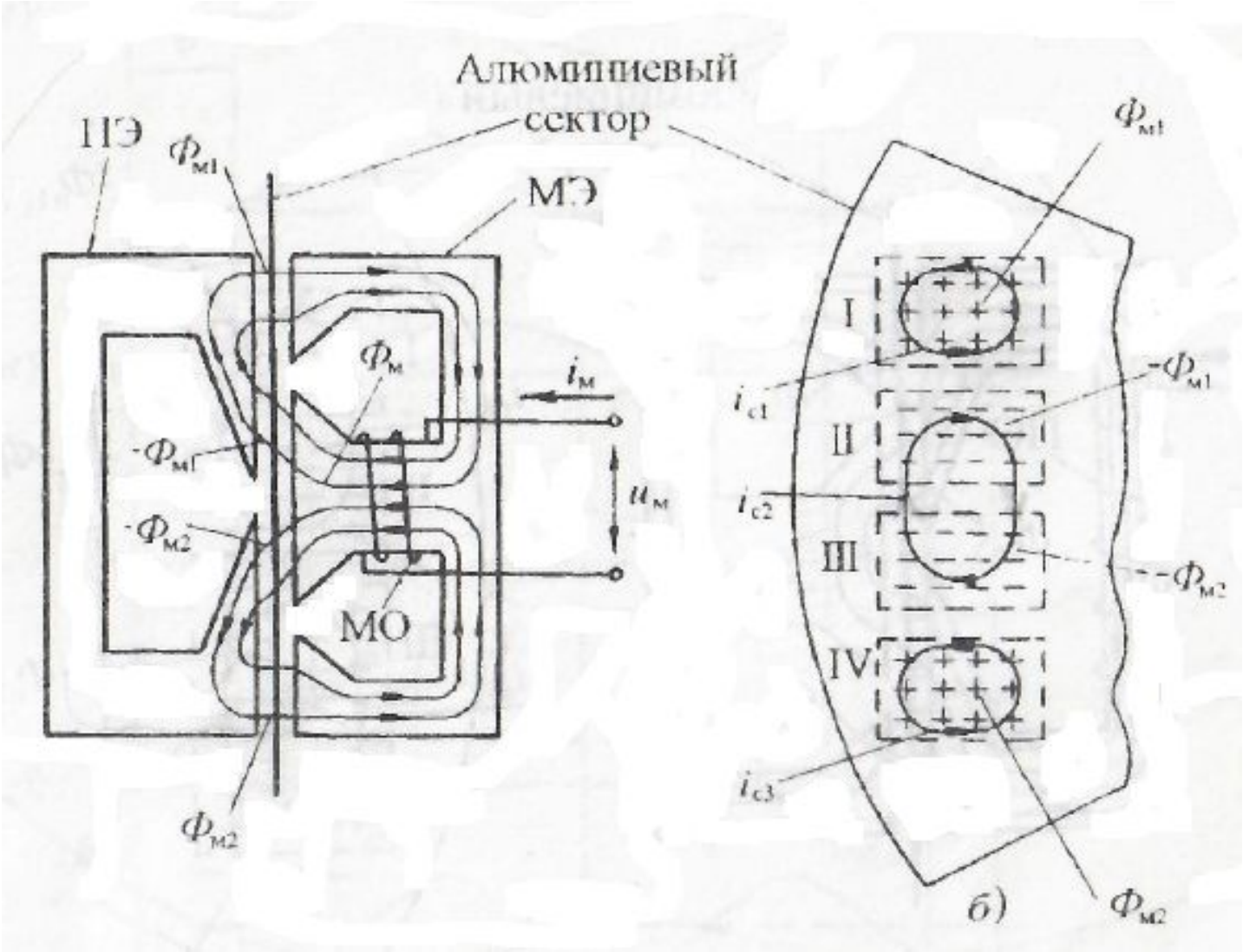
1. Фазовый угол между вихревыми токами в секторе и магнитным потоком, взаимодействующим с этими токами, должен быть отличен от $90^0$. Для этого требуется, чтобы вихревой ток индуктировался другим магнитным потоком, сдвинутого по фазе относительно первого магнитного потока на угол, отличный от нуля.
2. Сердечники МЭ и ПЭ представляют собой соответственно Ш-образный и П-образный пакеты из листовой электротехнической стали (рис. 7.1), МО расположена на среднем сердечнике.

Под действием переменных напряжений $u_{\text{м}}(t)$ и $u_{\text{п}}(t)$, приложенных к МО и ПО, по МО и ПО протекают переменные токи $i_{\text{м}}(t)$ и $i_{\text{п}}(t)$, сдвинутые по фазе относительно друг друга на некоторый угол $\varphi$:

(7.14)

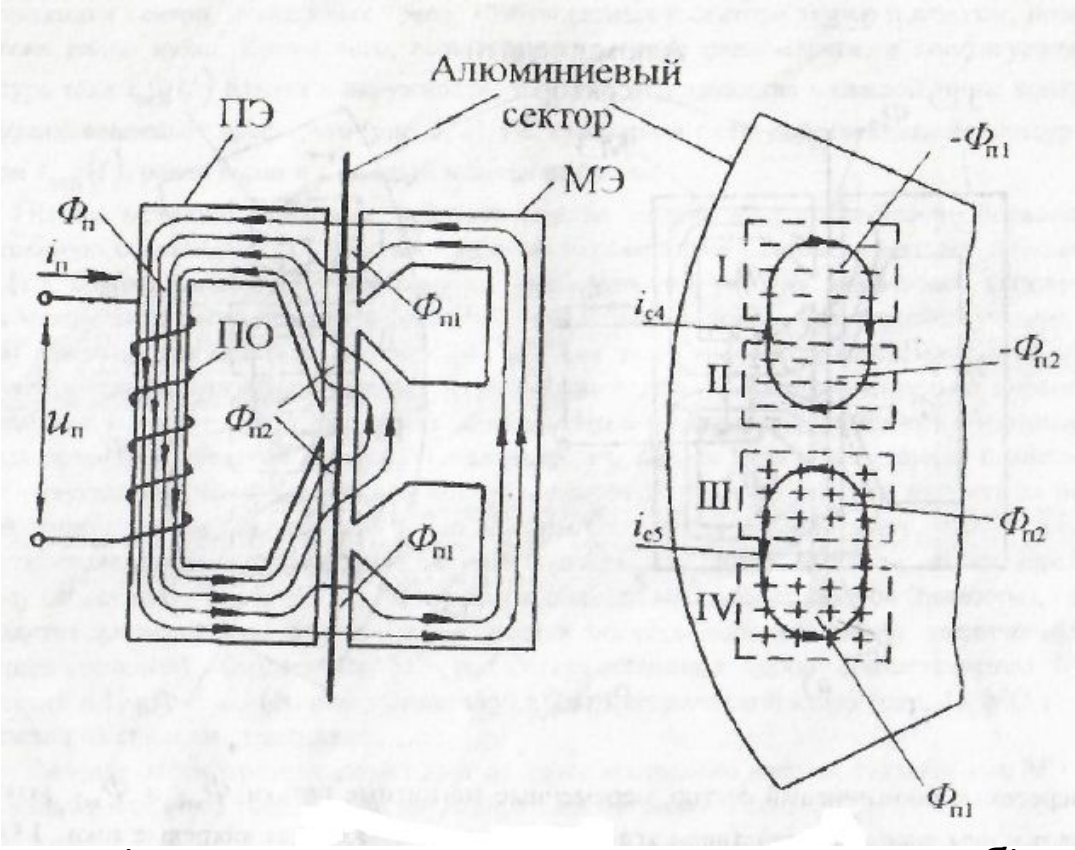
(7.15)

Ток $i_{\text{м}}$ создает в среднем стержне сердечника МЭ переменный магнитный поток $\Phi_{\text{м}}$ (рис. 7.6, а), который разделяется на две части ($\Phi_{\text{м}1}$ и $\Phi_{\text{м}2}$), замыкающиеся через стержни сердечника ПЭ в области полюсов, воздушные промежутки между полюсами сердечников и крайние стержни сердечника МЭ. Магнитные потоки $\Phi_{\text{м}1}$ и $\Phi_{\text{м}2}$ дважды пересекают алюминиевый сектор на четырех участках, которые соответствуют четырем воздушным промежуткам между полюсами сердечников ПЭ и МЭ и обозначены цифрами I, II, III, IV (рис. 7.6, б).




а) б)

Ток $i_п$ создает в сердечнике ПЭ переменный магнитный поток $\Phi_п$ (рис. 7.7, а), который также разделяется на две части ($\Phi_{п1}$ и $\Phi_{п2}$), замыкающиеся соответственно через крайний и средний стержни сердечника МЭ. Потоки $\Phi_{п1}$ и $\Phi_{п2}$ пересекают сектор на тех же участках I-IV (рис 7.7, б)



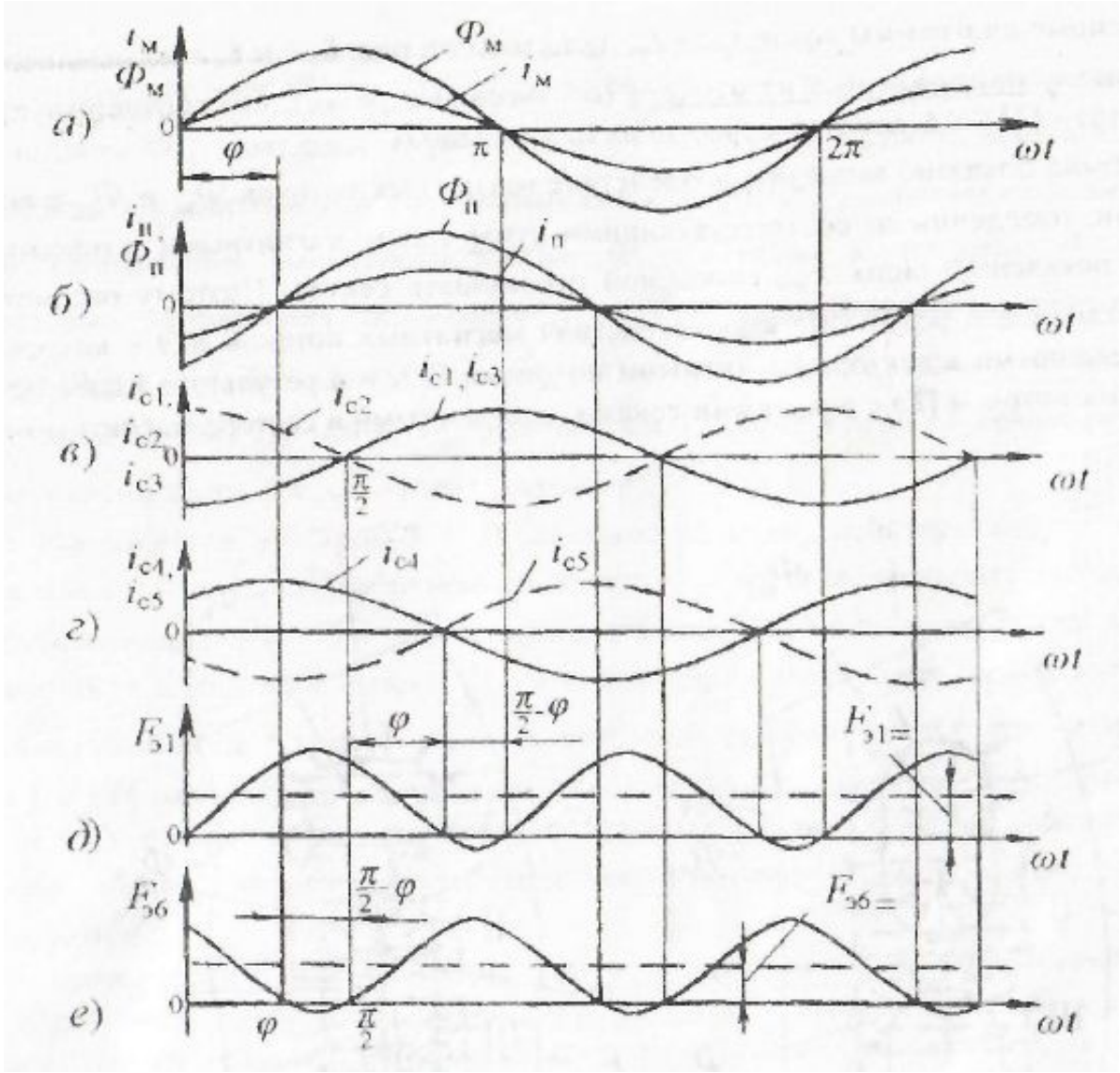

а) б)

Режим работы сердечников МЭ и ПЭ соответствует линейному участку кривой намагниченности сердечников. Учитывая, что на пути всех магнитных потоков имеются достаточно большие воздушные зазоры, и пренебрегая активными потерями в стали, можно приближенно считать, что магнитные потоки пропорциональны возбуждающим их токам (рис. 7.8, а и б), т.е. с учетом выражений (7.14) и (7.15)

(7.16)

(7.17)

где $K_{\text{м}}$ и $K_{\text{п}}$ – коэффициенты пропорциональности.


а)
$i_м$, $Ф_м$
$Ф_м$
$i_м$
0
$\varphi$
$\pi$
$2\pi$
$\omega t$
б)
$i_п$, $Ф_п$
$Ф_п$
$i_п$
0
$\omega t$
в)
$i_{c1}$, $i_{c2}$, $i_{c3}$
$i_{c1}$, $i_{c3}$
$i_{c2}$
0
$\frac{\pi}{2}$
$\omega t$
г)
$i_{c4}$, $i_{c5}$
$i_{c4}$
$i_{c5}$
0
$\omega t$
д)
$F_{э1}$
$\varphi$
$\frac{\pi}{2}-\varphi$
$F_{э1=}$
0
$\omega t$
е)
$F_{э6}$
$\frac{\pi}{2}-\varphi$
$F_{э6=}$
0
$\varphi$
$\frac{\pi}{2}$
$\omega t$

Вихревые токи, наведенные в секторе рассмотренными магнитными потоками, отстают от соответствующих потоков на угол $\pi/2$ согласно (7.13). с учетом принятого направления этих потоков на участках сектора (рис. 7.6 и 7.7) и соотношений (7.16) и (7.17), для вихревых токов можно записать

(7.18)

(7.19)

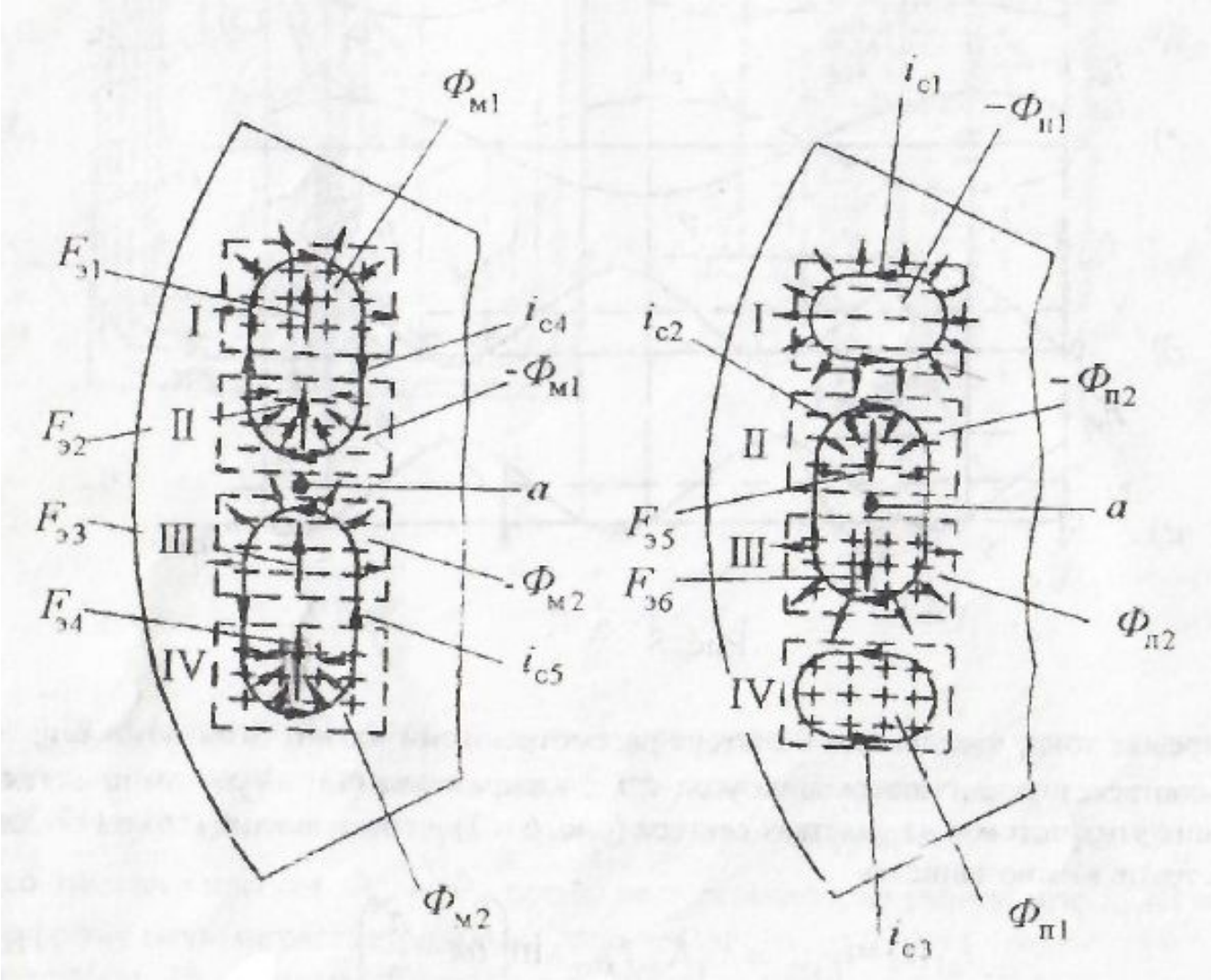
(7.20)

(7.21)

где $K_1$, $K_2$, $K_4$ и $K_5$ – постоянные коэффициенты.

На рис. 7.9, а показаны магнитные потоки $\Phi_{м1}$ и $\Phi_{м2}$, а также токи $i_{с4}$ и $i_{с5}$, наведенные в секторе магнитным потоком $\Phi_{п}$ (направления потоков и токов соответствует случаям, рассмотренным выше). Силы, возникающие в каждой точке контуров тока (показаны маленькими стрелками) в результате взаимодействия с магнитными потоками, в пределах каждого участка сектора полностью не компенсируют друг друга и образуют некоторые эквивалентные силы $F_{э1} - F_{э4}$ , направленные вверх.

Магнитные потоки $\Phi_{п1}$ и $\Phi_{п2}$, а также вихревые токи $i_{с1} - i_{с3}$, наведенные магнитным потоком $\Phi_{м}$, показаны на рис. 7.9, б. На участках II и III силы, действующие на контур с током $i_{с2}$, образуют эквивалентные силы $F_{э5}$ и $F_{э6}$, направленные вниз (при принятом направлении магнитного потока $\Phi_{п}$).


Фм1
Fэ1
I
iс4
-Фм1
Fэ2
II
a
Fэ3
III
-Фм2
Fэ4
IV
iс5
Фм2
iс1
-Фп1
iс2
I
-Фп2
II
Fэ5
a
III
Fэ6
Фп2
IV
iс3
Фп1

а) б)

Силы $F_{э1} - F_{э4}$, образованные в результате взаимодействия магнитного потока МЭ с вихревыми токами в секторе, наведенными магнитным потоком ПЭ, можно заменить одной суммарной силой

(7.22)

приложенной к сектору в точке $a$, находящейся на границе участков II и III (рис. 7.9,а).

Сила $F_{эI}$ относительно оси 4 (рис. 7.1) создает вращающий момент

(7.23)

где $R$ – расстояние от точки $a$ (рис. 7.9, а) до оси сектора.

Поскольку силы $F_{э1} - F_{э4}$ изменяются во времени одинаково, рассмотрим одну из них, например, $F_{э1}$. Мгновенное значение этой силы определяется соотношением

(7.24)

где $c_1$ – постоянный коэффициент.

С учетом выражений (7.16), (7.20) и (7.6) получаем

(7.25)

Переходя к действующим значениям токов ($I_{\text{м}} = I_{\text{м}m}/\sqrt{2}$ и $I_{\text{п}} = I_{\text{п}m}/\sqrt{2}$) и учитывая, что $\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) = -\sin\varphi$, для первой (постоянной) составляющей силы $F_{\text{э}1}(t)$, на которую реагирует сектор, получаем

(7.26)

Соотношения для сил $F_{\text{э}2}(t) - F_{\text{э}4}(t)$, полученные таким же образом, аналогичны соотношению (7.25). Тогда из (7.23), (7.22) и (7.26) для постоянной составляющей вращающего момента $M_{\text{I}}$ получаем:

(7.27)

где $K_{\text{I}}$ – постоянный коэффициент.

Силы $F_{э5}$ и $F_{э6}$ также образуют суммарную силу, действующую на сектор в точке $a$ (рис. 7.9, б)

(7.28)

которая, создает вращающий
момент

(7.29)

Рассмотрим силу $F_{э6}$. Для принятых на рис. 7.9, б направлений $\Phi_{п2}$, $i_{с2}$ и $F_{э6}$, можно записать

(7.30)

или с учетом выражений (7.17), (7.19) и (7.6)

(7.31)

Учитывая, что $\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) = \sin\varphi$, для первой, постоянной составляющей силы $F_{\text{эб}}(t)$ имеем

(7.32)

Таким образом, направление постоянной составляющей силы $F_{э6}$ (а также силы $F_{э5}$) противоположно направлению, указанному на рис. 7.9, б. вращающий момент $M_{II=}$, создаваемый силами $F_{э5}$ и $F_{э6}$, направлен согласно с моментом $M_{I=}$ и определяется соотношением

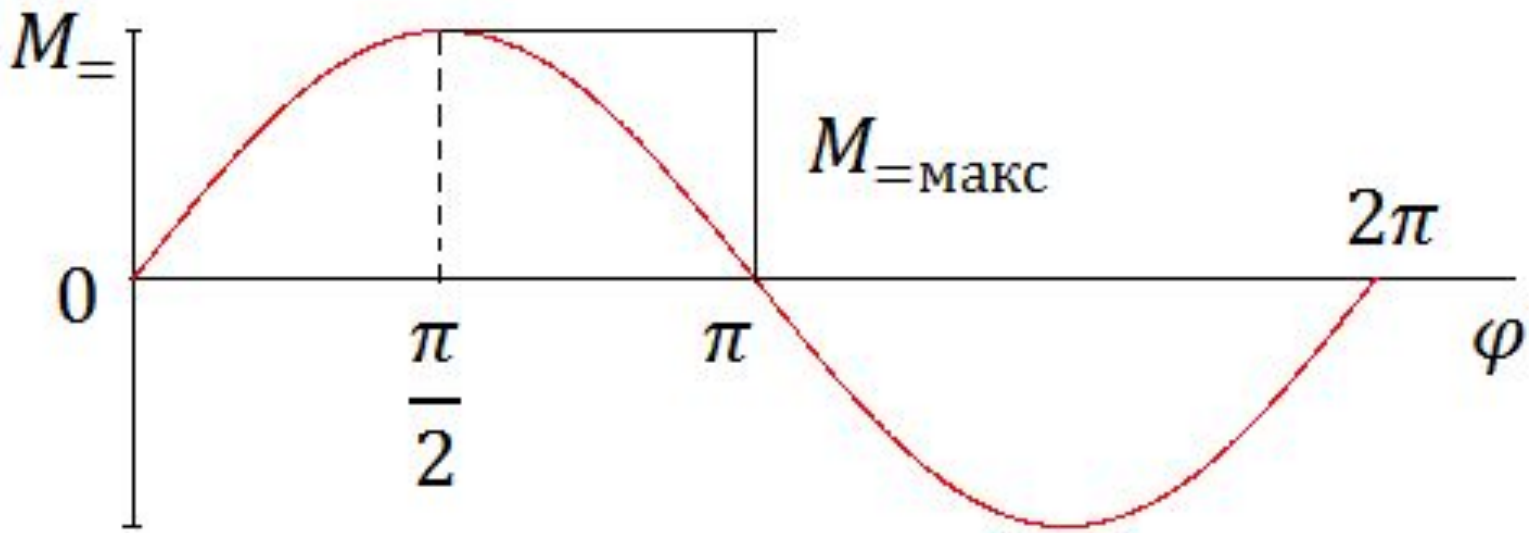
(7.33)

Постоянная составляющая суммарного магнитного момента $M_{=}$ ( $M_{=} = M_{I=} + M_{II=}$ ) на основании (7.27) и (7.33) определяется соотношением

(7.34)

где $K_{вр} = K_{I} + K_{II}$.

Зависимость вращающего момента $M_=$ от угла $\varphi$ между токами $I_п$ и $I_м$, вытекающая из соотношения (7.34), показана на рис. 7.10 (токи $I_п$ и $I_м$ приняты неизменными).



Поскольку при $\varphi = 90^0$ вращающий момент $M_=$ максимален, и для получения значения $M_=$, обеспечивающего подъем сектора до определенного уровня (например, до уровня, соответствующего замыканию фронтовых контактов, т.е. до уровня прямого подъема), требуется минимальное значение $I_п$ (или $U_п$), то угол $\varphi$, равный $90^0$, называют **идеальным фазовым углом ($\varphi_{ид}$)**.

Если угол $\varphi$ отклоняется от $90^0$, то момент $M_=$ уменьшается (т.к. в этом случае уменьшается значение $\sin\varphi$). При $\varphi \neq 90^0$ для получения того же значения $M_=$, которое достигается при $\varphi = 90^0$, значение $I_п$ следует увеличить.

При $\varphi = \varphi_{\text{ид}} = 90^0$ вращающий момент, соответствующий прямому подъему ($M_{\text{пр.п}}$), согласно (7.34) равен

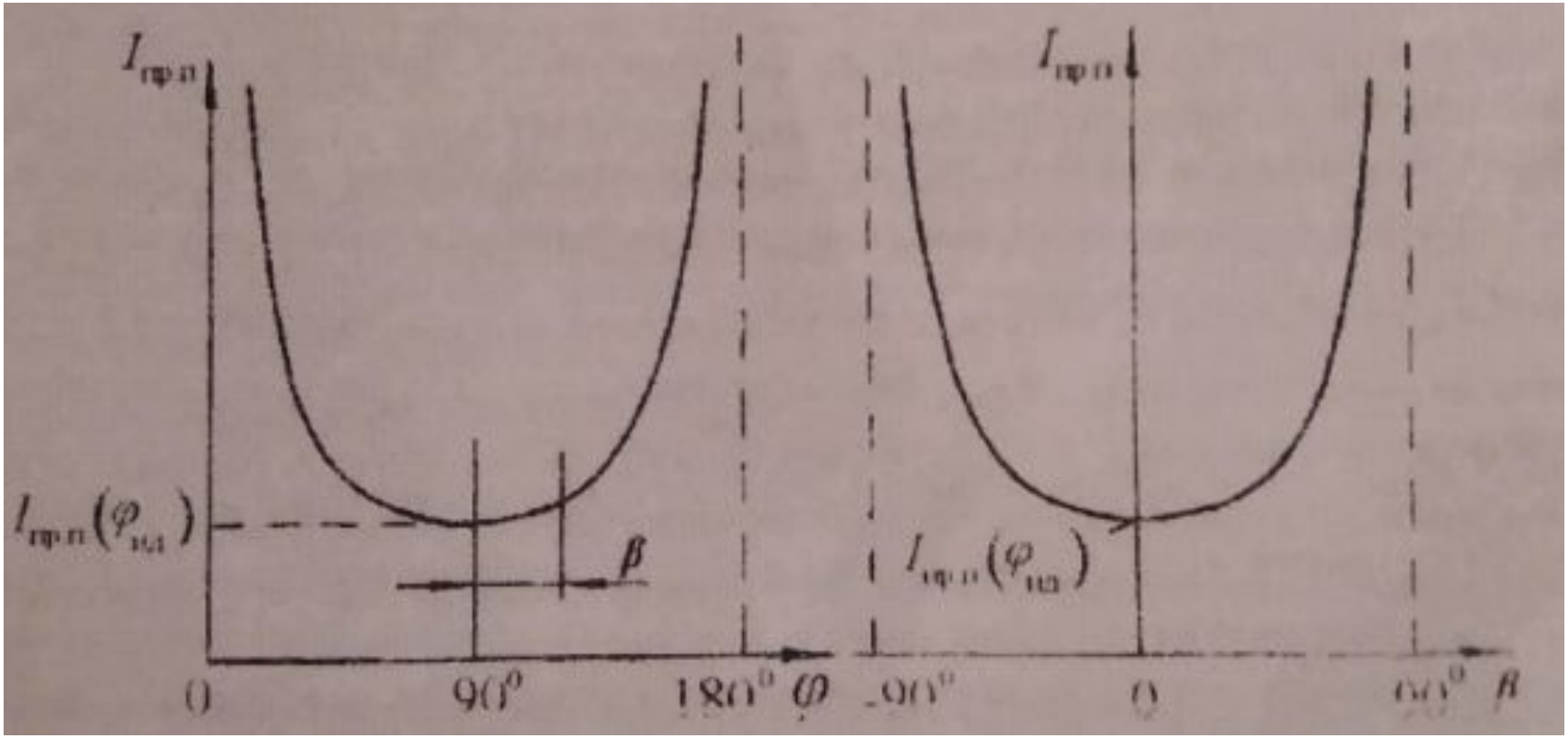
(7.35)

При $\varphi \neq \varphi_{\text{ид}}$ то же самое значение вращающего момента определяется соотношением

(7.36)

Приравнивая правые части (7.35) и (7.36), получаем

(7.37)


$I_{пр.п}$
$I_{пр.п}(\varphi_{ном})$
$\beta$
0
90°
180°
$\varphi$
$I_{пр.п}$
$I_{пр.п}(\varphi_{ном})$
-90°
0
90°
$\beta$

а) б)

Иногда рассматривают зависимость параметров срабатывания и отпускания не от угла $\varphi$, а от угла $\beta$, который характеризует отклонение угла $\varphi$ от $\varphi_{\text{ид}}$ (рис. 7.11, а), т.е.

(7.38)

Учитывая, что в этом случае $\varphi = \frac{\pi}{2} + \beta$ , а $\sin\varphi = \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) = \cos\beta$ , то вместо зависимости (7.37) можно записать

(7.39)

Выражение (7.39) называется **фазовой функцией** реле ДСШ.

Если изменить направление тока $i_{\text{П}}(t)$ в ПО, т.е. если $180^0 < \varphi < 360^0$, то направление вращающего момента $M_{=}$ изменяется на противоположное (рис. 7.10).

Поскольку значение $M_{=}$ , а следовательно процесс срабатывания и отпускания реле ДСШ зависят не только от амплитуды тока $i_{\text{П}}$, но и от сдвига фаз между токами $i_{\text{П}}$ и $i_{\text{М}}$, то такие реле называют **фазочувствительными**.

Для получения больших выдержек времени на срабатывание в железнодорожной автоматике применяют **реле с термическим элементом** и **стабилитронные реле**.

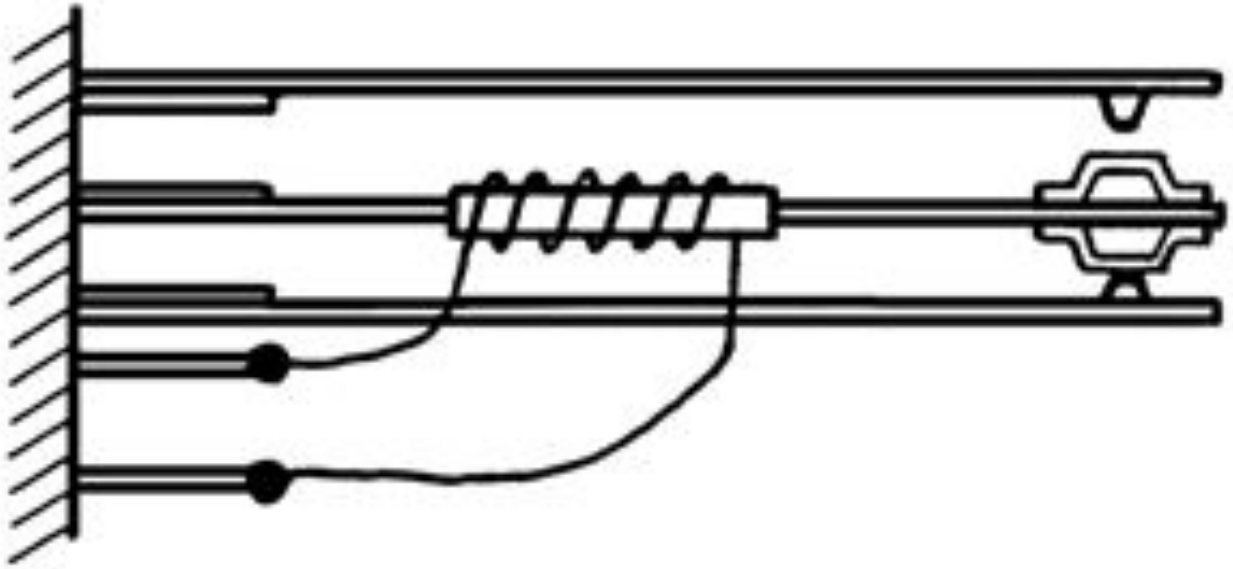


Рис. 7.12. Термовключатель

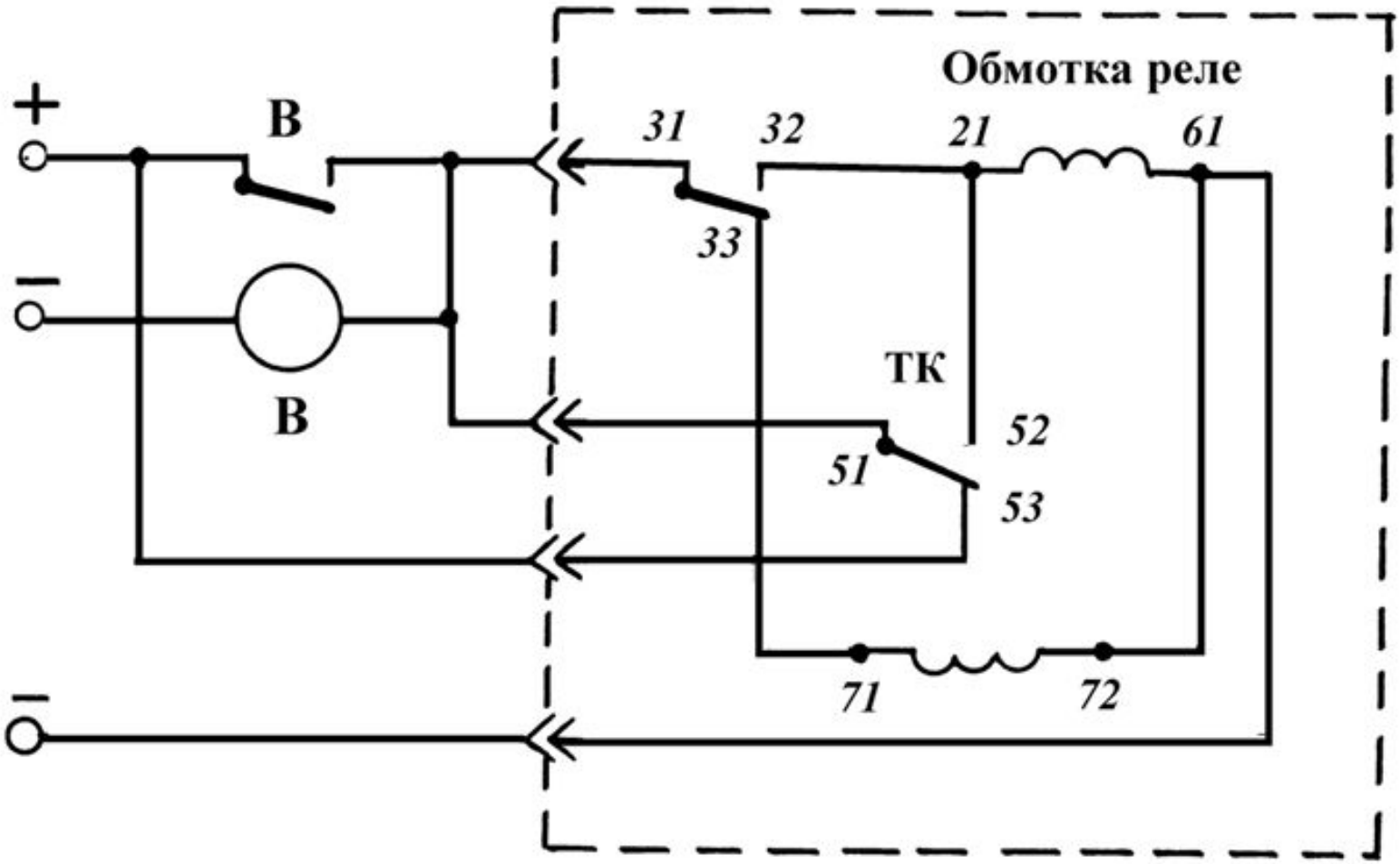



Рис.7.13. Схема включения реле типа АНШМТ-380

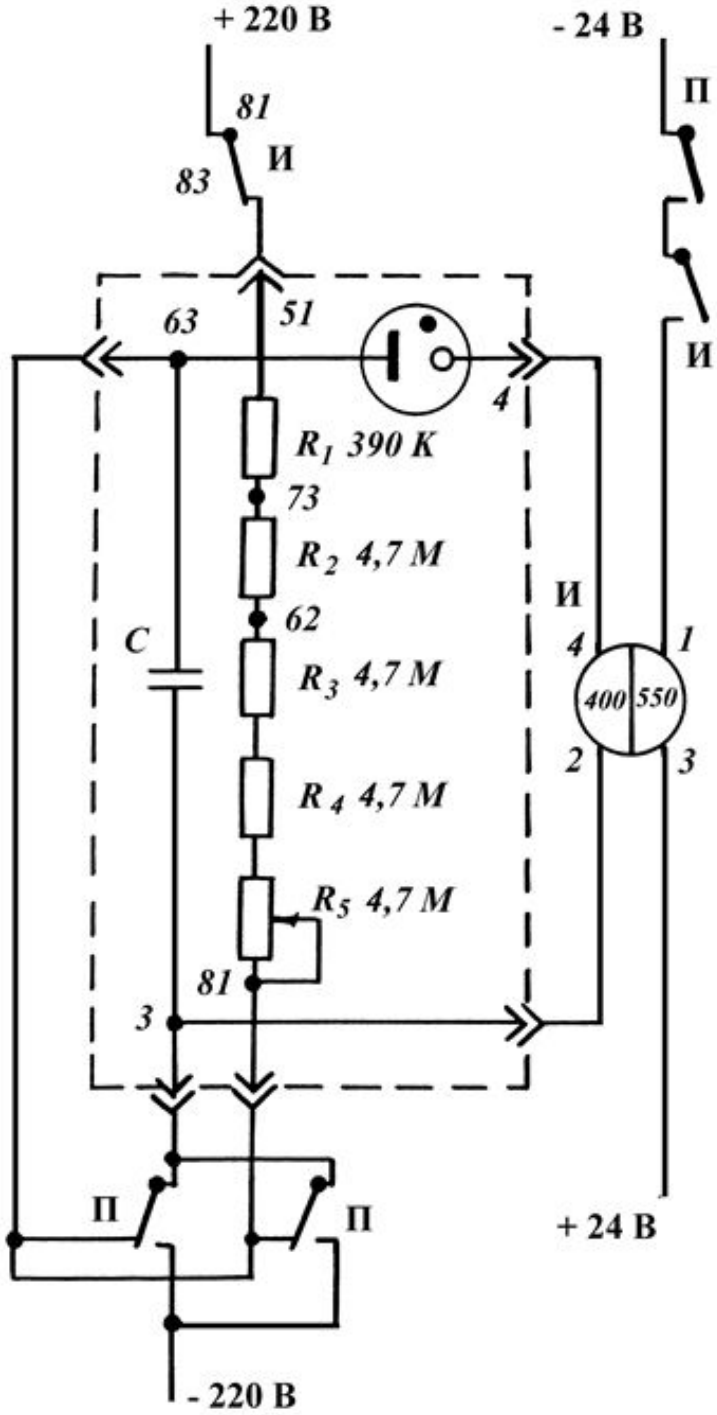



Рис. 7.14. Схема стабилитронного реле

При замыкании контактов пускового реле *П* начинается заряд конденсатора $C$ от источника постоянного напряжения $U_{\text{в}} = 220$ В через резисторы $R1 - R5$, в соответствии с выражением

(7.40)

в котором $\tau = RC$ – постоянная времени цепи заряда, $R$ – сопротивление резисторов, через которые производится заряд.

В течение интервала времени $t_{\text{з}}$, конденсатор зарядится до напряжения зажигания стабилитрона $U_{\text{з}}$. Величина $t_{\text{з}}$, определяется из выражения

(7.41)

при $U_{\text{с}} = U_{\text{з}}, t = t_{\text{з}}$. $t_{\text{з}} = 16{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot R.$