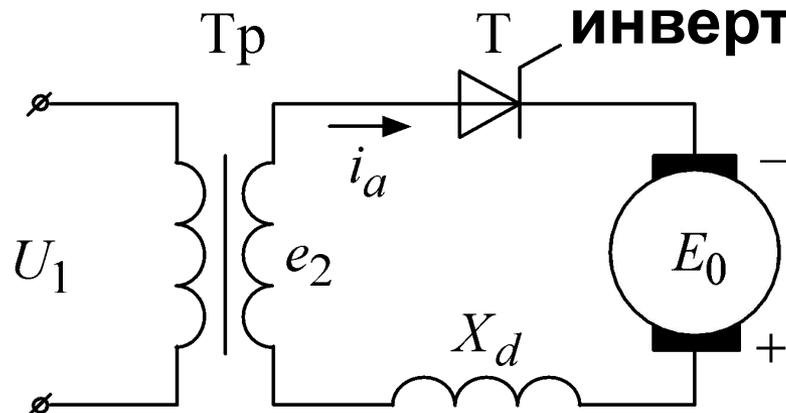


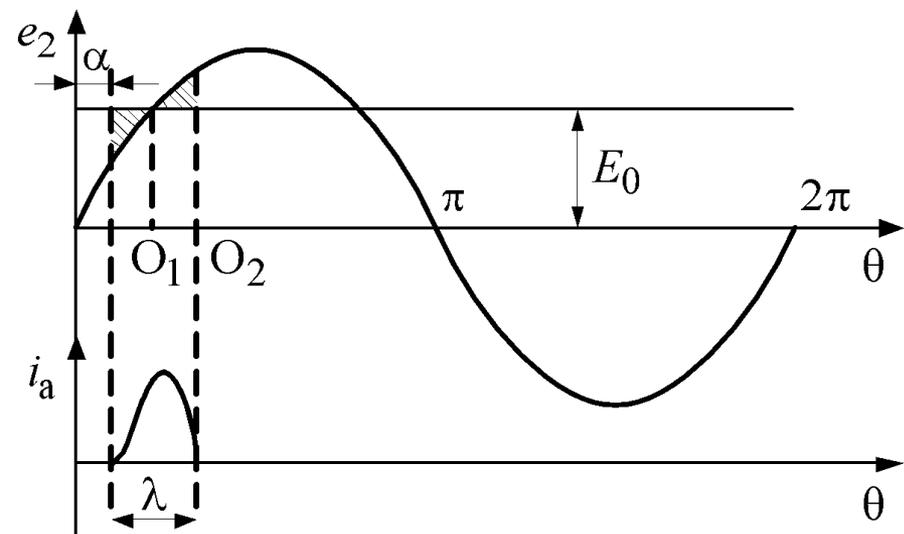
Зависимые инверторы



В схемном отношении зависимый инвертор аналогичен управляемому выпрямителю

Его единственным отличием от такой же схемы управляемого выпрямителя является противоположная полярность источника E_0 , в результате чего при протекании в цепи тока i_a , ЭДС E_0 выступает не в роли против ЭДС (потребителя энергии), как это было в управляемом выпрямителе, а в роли источника энергии, так как направление тока i_a и E_0 совпадают.

Для того, чтобы поток энергии был направлен в питающую сеть, необходимо, чтобы этот же ток i_a протекал по вторичной обмотке трансформатора, преодолевая против ЭДС e_2 .



Пусть в точке $\theta = \alpha$ система управления включает тиристор Т. Тогда на участке $(\alpha - O_1)$ ток i_a будет протекать под действием разности ЭДС E_0 и e_2 и поток энергии будет направлен из источника постоянного тока E_0 в питающую сеть.

При этом часть энергии запасается в магнитном поле индуктивного сопротивления X_d .

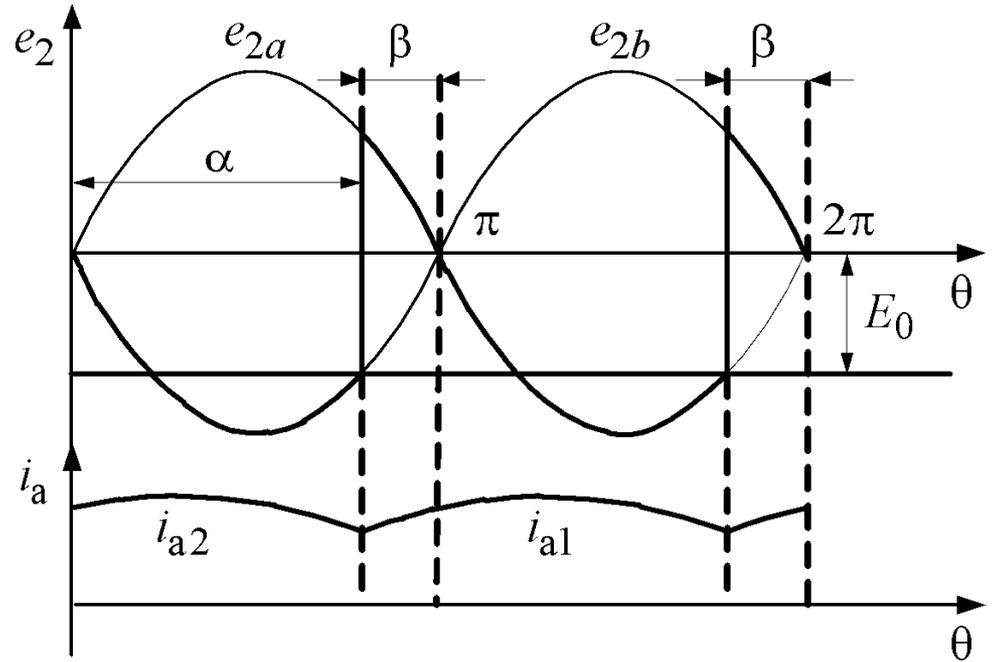
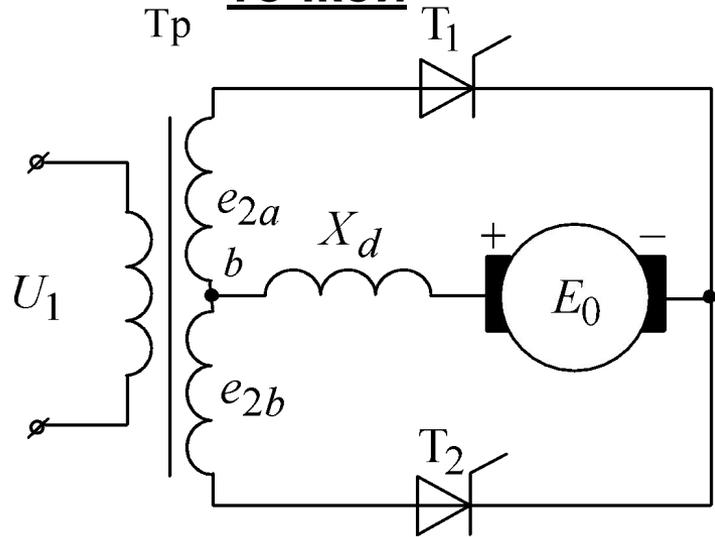
В точке O_1 ЭДС e_2 сравнивается с E_0 , но вентиль Т будет по-прежнему открыт под действием ЭДС $e_x = -X_d \frac{di_a}{d\theta}$ до тех пор, пока не иссякнет запасенная в X_d энергия.

Далее на всех положительных полупериодах процессы повторяются.

На отрицательных полупериодах тиристор Т должен быть обязательно закрыт, так как в течение этого интервала e_2 и E_0 включены согласно и включение тиристора Т приведет к аварийному режиму, называемому «опрокидыванием инвертора», когда в цепи двух источников e_2 и E_0 будет протекать ток i_a , ограниченный только индуктивным сопротивлением X_d

$$i_a = \frac{e_2 + E_0}{X_d}$$

Двухполупериодный зависимый инвертор со средней точкой



Предположим, что начиная с $\theta = 0$, ток проводит тиристор T_2 . При достаточно большой величине X_d ток на интервале будет непрерывным и будет протекать от источника E_0 , преодолевая против ЭДС e_{2b} вторичной обмотки трансформатора, и поток энергии будет направлен из источника E_0 в питающую

сеть. Если тиристор T_2 будет открыт после точки π , то на интервале $(\pi \div 2\pi)$ возникает, аварийный режим, и инвертор «опрокидывается». Во избежание этого тиристор T_2 надо обязательно закрыть до точки π . Поэтому в точке $(\pi - \beta)$ система управления открывает тиристор T_1 .

В этот момент времени в цепи тиристора T_1 имеет место согласное включение e_{2a} и E_0 , поэтому в интервале $(\pi - \beta) \div \pi$ ток i_{a1} будет протекать под действием суммы $(e_{2a} + E_0)$, а в точке π полярность e_2 изменится на противоположную и ток i_{a1} будет протекать, преодолевая против ЭДС e_{2a} , т.е. поток энергии будет снова направлен из E_0 в питающую сеть.

Одновременно с открытием тиристора T_1 выключается тиристор T_2 (при условии $x_a = 0$), т.к. к нему будет приложена суммарная ЭДС $(e_{2a} + e_{2b})$ в запирающем направлении в течение интервала β .

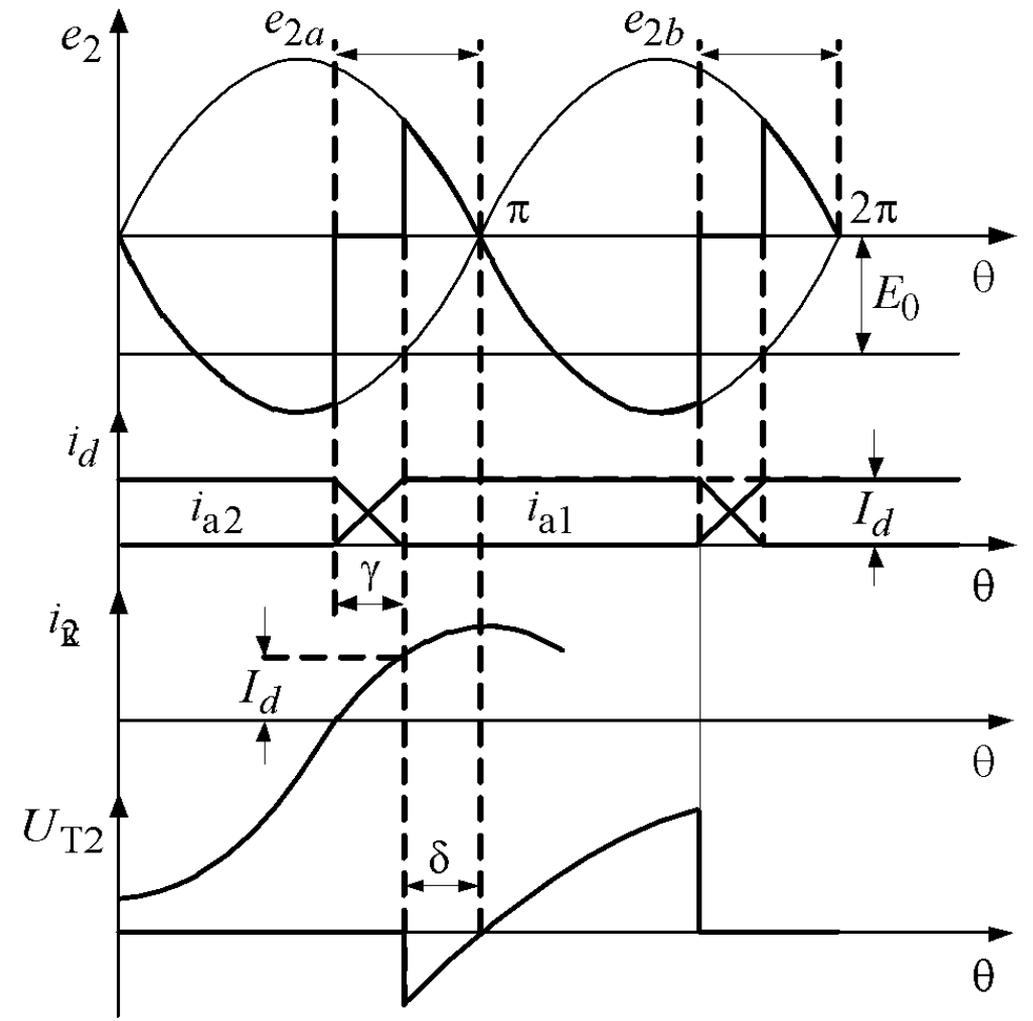
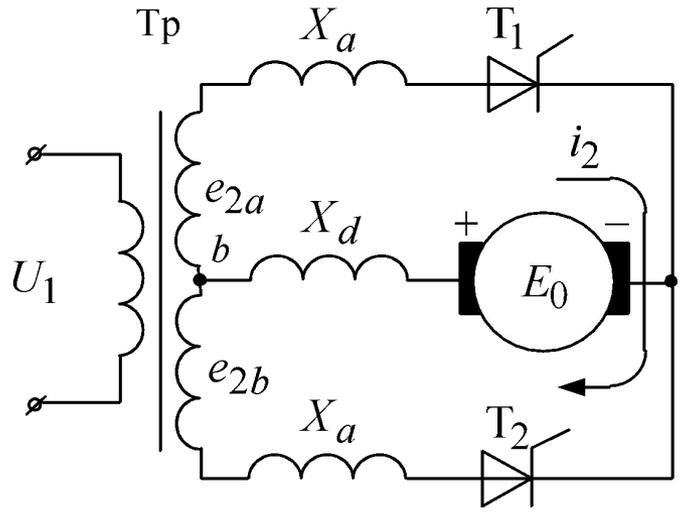
Поскольку тиристор закрывается не мгновенно, а в течение времени $t_{\text{ВЫК}}$, определяемого из его паспортных данных, то длительность интервала β должна быть не менее $\omega \cdot t_{\text{ВЫК}}$; $\beta \geq \omega \cdot t_{\text{ВЫК}}$.

Угол β называется углом опережения.

Мгновенное значение против ЭДС $e_{d\beta}$, создаваемой вторичной обмоткой трансформатора, при протекании тока i_d от источника E_0 :

$$E_{d\beta} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\pi-\beta}^{2\pi-\beta} \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin\theta \cdot d\theta = -\frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot E_2}{\pi} \cdot \cos\beta$$

Особенности коммутационных процессов в зависимых инверторах



Рассмотрим коммутационный процесс, начинающийся в точке $(\pi - \beta)$. Тиристор T_1 , открываясь в точке $(\pi - \beta)$, подключает к тиристору T_2 запирающее напряжение $(e_{2a} + e_{2b})$. Тиристор T_2 будет находиться после этого в открытом состоянии еще в течение интервала γ , пока не иссякнет запасенная в X_a электромагнитная энергия.

В результате образуется коммутационный контур, для которого справедливо уравнение:

$$e_{2a} - 2X_a \frac{di_{2k}}{d\theta} + e_{2b} = 0.$$

Решая это уравнение относительно тока i_{2k} с учетом нулевых начальных условий, получим:

$$i_{2k} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{X_a} \cdot (\cos(\pi - \beta) - \cos\theta)$$

На указанном интервале ток i_{2k} представляет собой ток i_{a1} , вентиля T_1 , вступающего в работу. Когда этот ток достигнет величины I_d – тока источника питания E_0 , процесс коммутации заканчивается.

Длительность коммутационного интервала γ

$$\gamma = \beta - \arccos\left(\frac{I_d \cdot X_a}{\sqrt{2} \cdot E_2} + \cos\beta\right)$$

В течение интервала коммутации γ вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, поэтому мгновенное значение противо ЭДС равно нулю

$$e_{d\beta} = \frac{e_{2a} + e_{2b}}{2} = 0$$

И поэтому среднее значение противо ЭДС инвертора

$$E_{d\beta} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\pi-\beta+\gamma}^{2\pi-\beta} \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta$$

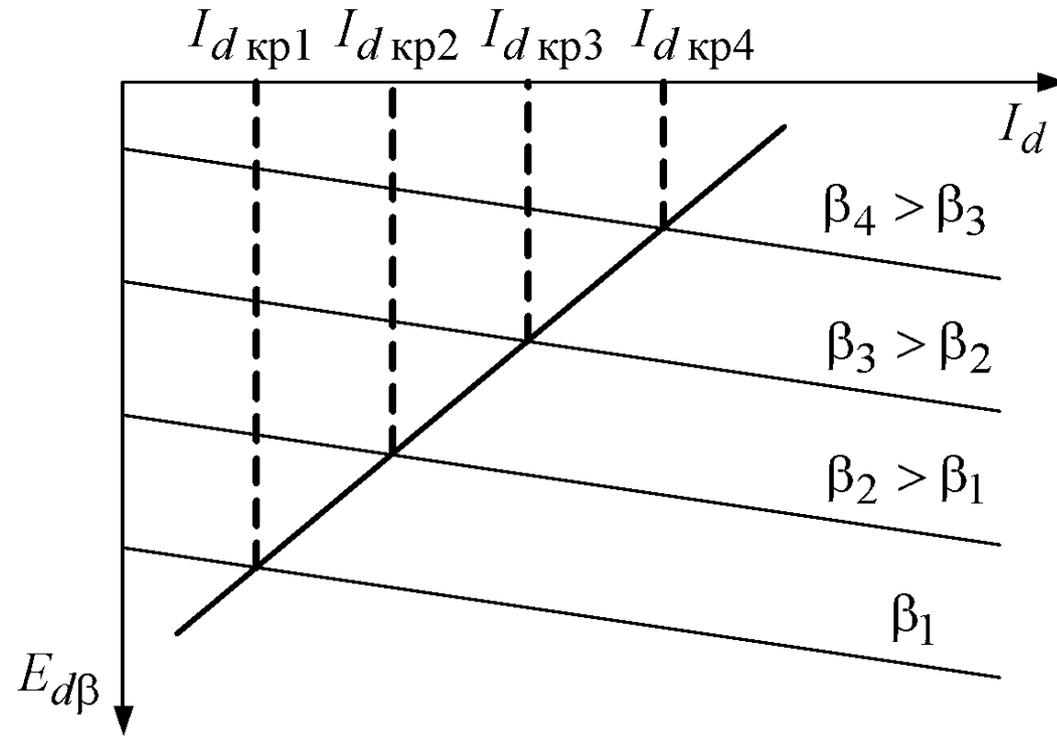
будет отличаться на величину

$$\Delta U_x = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\pi-\beta}^{\pi-\beta+\gamma} \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \frac{I_d \cdot X_a}{\pi}$$

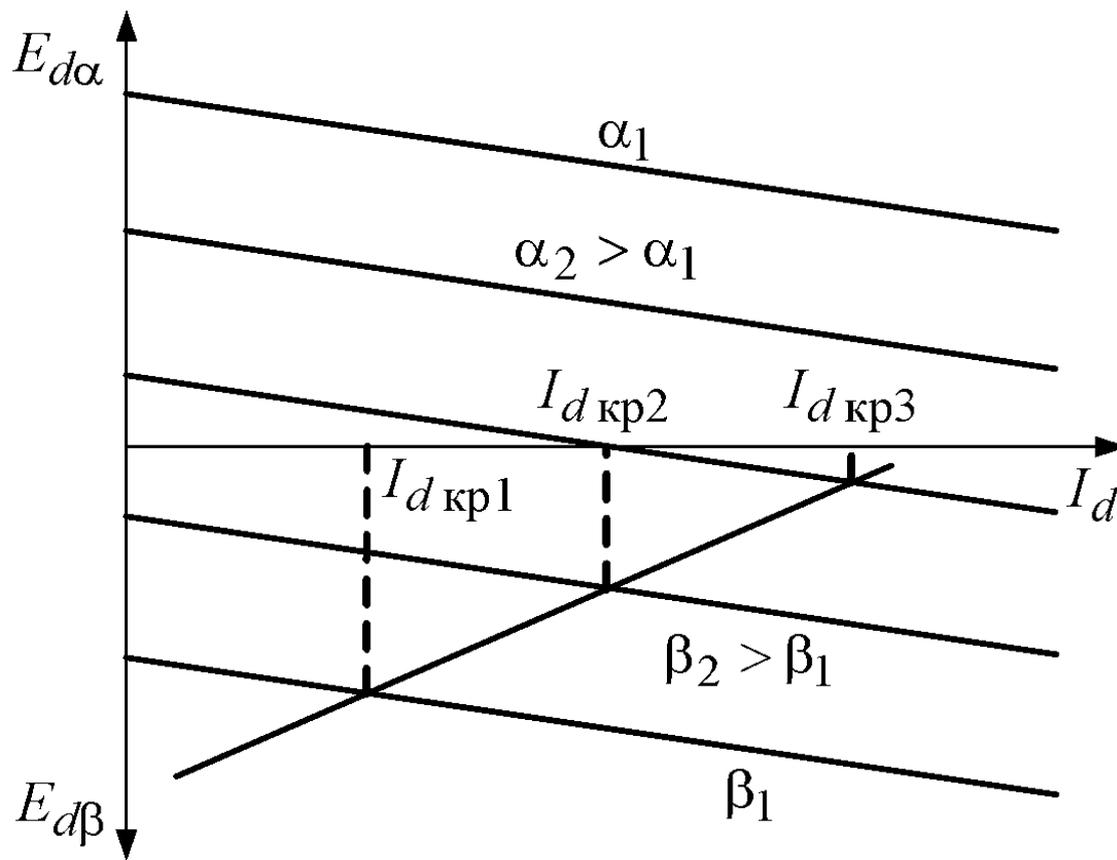
Но поскольку на величину, определяемую ΔU_x , уменьшилась площадь, расположенная выше оси абсцисс, а отрицательная площадь осталась без изменения, то

$$E_{d\beta} = E_{d\beta 0} - \Delta U_x = -\frac{2\sqrt{2} \cdot E_2}{\pi} \cdot \cos \beta - \frac{I_d \cdot X_a}{\pi}$$

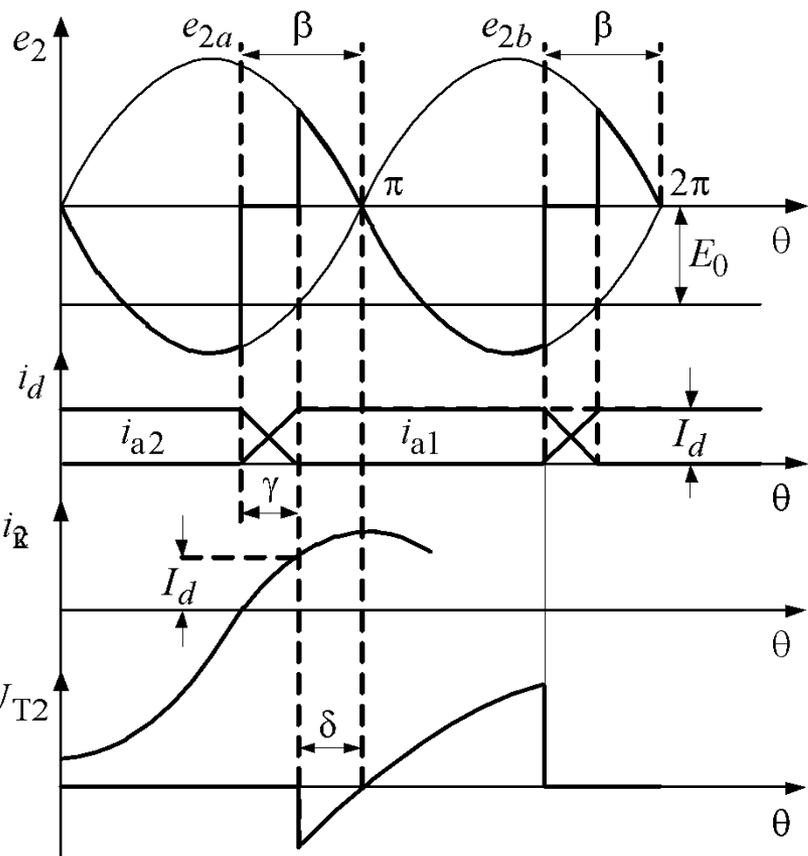
Последнее выражение представляет собой зависимость $E_{d\beta} = f(I_d)$ и называется входной характеристикой инвертора.



Поскольку вентильный преобразователь может быть переведен из режима выпрямления в режим инвертирования изменением угла управления ($\alpha < \pi/2$ - выпрямительный режим, $\alpha > \pi/2$ - инверторный), то внешние характеристики управляемого выпрямителя $E_{d\alpha} = f(I_d)$ и входные характеристики инвертора $E_{d\beta} = f(I_d)$ удобно совмещать на одной диаграмме.



Как видно из диаграммы, из-за коммутационных процессов запирающее напряжение к выходящему из работы вентилю прикладывается только в точке $(\pi - \delta)$, и поэтому вентиль должен успеть закрыться в течение интервала δ , т.к. в противном случае в точке π полярность e_2 изменится на противоположную и произойдет «опрокидывание» инвертора. Угол $\delta = \beta - \gamma$ называется углом запаса и его минимальное значение определяется временем выключения тиристора:



Отсюда следует, что рост угла коммутации ограничивается некоторым критическим значением δ_{\min}

т.е. каждому значению угла β соответствует критическое значение тока I_{dkp}' , при котором $\gamma = \gamma_{кр}$

Превышение этих значений токов приводит к «опрокидыванию» инвертора, так как

$$\delta < \delta_{\min}$$

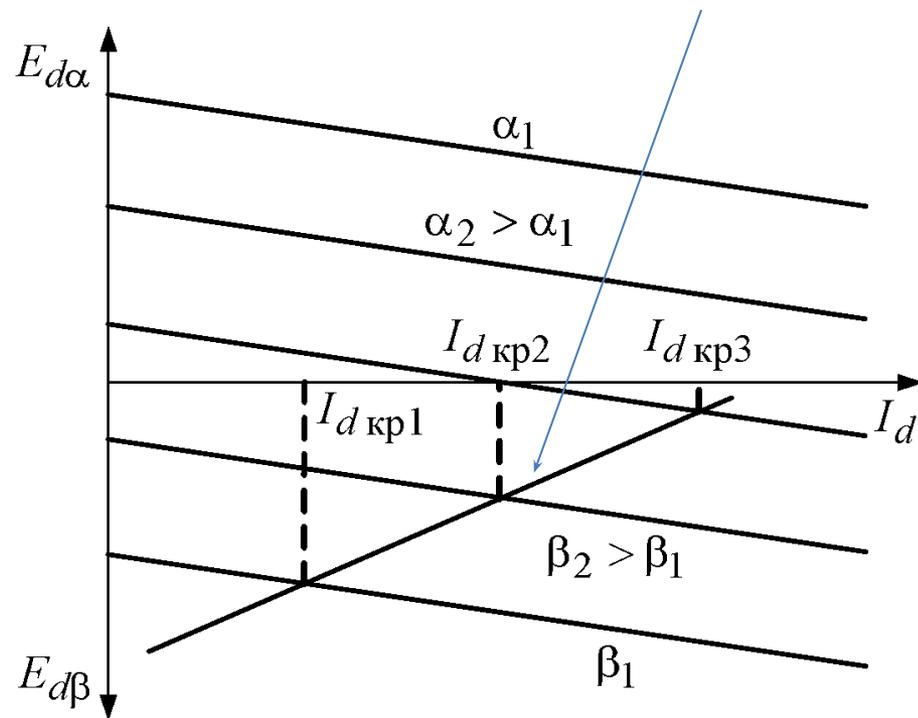
Соединяя все точки $E_{d\beta}$ соответствующие критическим значениям токов $I_{dкр}$, получаем ограничительную характеристику зависимого инвертора, разделяющую рабочую область выходных характеристик от нерабочей.

Учитывая, $\delta = \beta - \gamma$ получаем
 что М:

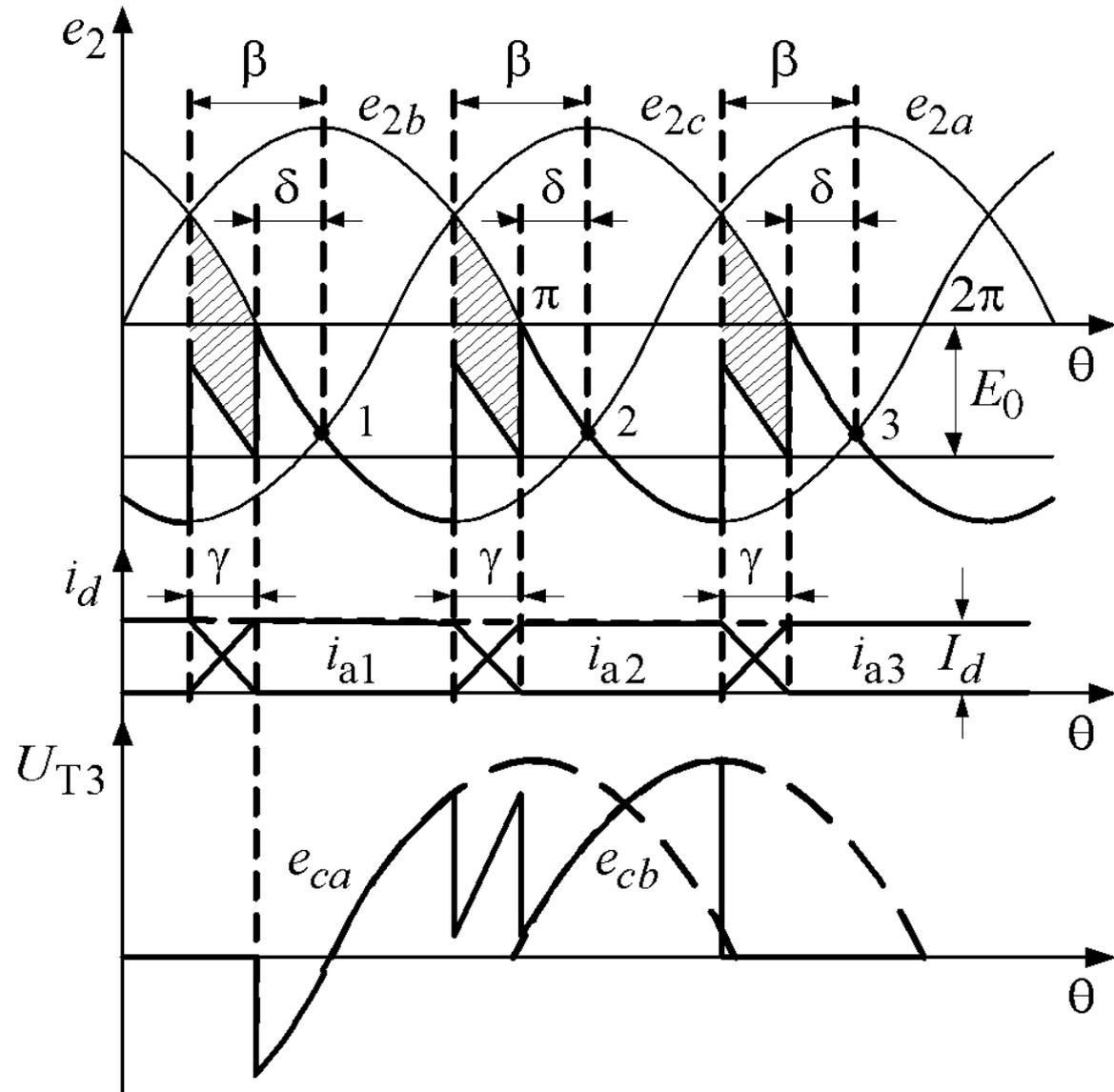
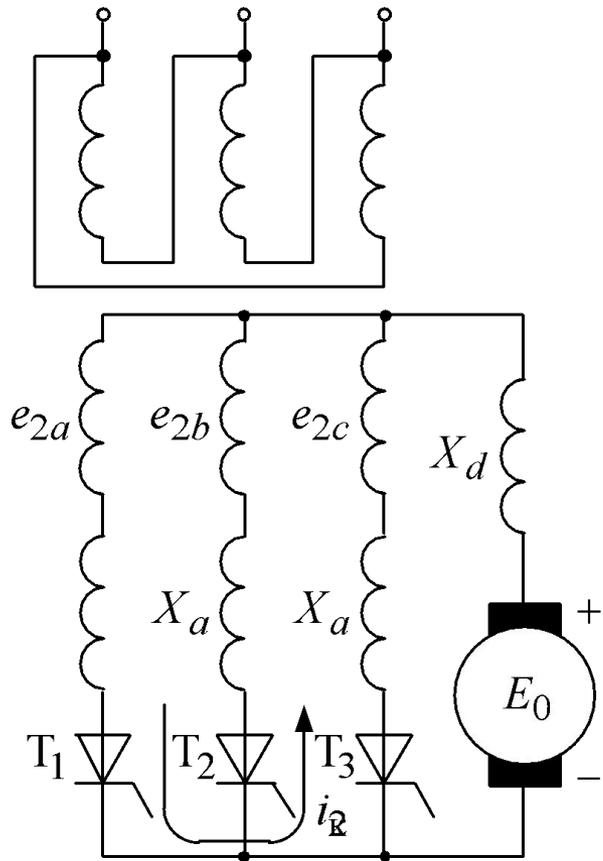
$$I_{dкр} = \frac{\sqrt{2}E_2}{X_a} \cdot (\cos\delta_{\min} - \cos\beta)$$

$$E_{d\beta_{кр}} = -\frac{2\sqrt{2}E_2}{\pi} \cdot \frac{\cos\delta_{\min} + \cos\beta}{2}$$

По данным зависимостям можно построить ограничительную характеристику.



Трехфазный нулевой зависимый инвертор



В рассматриваемом трехфазном нулевом зависимом инверторе - $X_d = \infty$,

В отличие от однофазной схемы зависимого инвертора здесь отсчет углов опережения β осуществляется от точек пересечения фазных ЭДС.

Поскольку ток от источника питания E_0 должен протекать по обмоткам трансформатора, преодолевая фазные ЭДС, то рабочими являются участки ЭДС e_{2a} ; e_{2b} ; e_{2c} , расположенные ниже оси абсцисс.

Пусть в точке $\theta = 0$ проводил ток вентиль T_3 , преодолевая против ЭДС e_{2c} .

В точке $\theta = 2\pi/3$ ЭДС e_{2c} изменит полярность на противоположную и из против ЭДС превратится в согласно включенную ЭДС, что при открытом вентиле T_3 приведет к «опрокидыванию» инвертора.

Чтобы не допустить этого, нужно раньше этого момента выключить вентиль T_3 . Для этого в точке $(\alpha - \beta)$ система управления открывает вентиль T_1 , ток переходит на фазу a , так как против ЭДС e_{2a} , действующая в этой цепи, меньше, чем e_{2c} , в цепи вентиля T_3 , открываясь, подключает потенциал фазы a к катоду вентиля T_3 , а анод T_3 имеет потенциал фазы c .

В результате T_3 оказывается под запирающим напряжением $(e_{2c} - e_{2a})$ но закрыться мгновенно он не может из-за ЭДС самоиндукции $\left(X_a \cdot \frac{di_{a3}}{d\theta} \right)$

которая поддерживает прежнее направление тока i_{a3} , пока не израсходуется энергия, запасенная в магнитном поле индуктивного

сопротивления X_a . Поэтому в течение интервала γ будут одновременно открыты оба вентиля T_1 и T_3 , что приводит к появлению коммутационного контура между фазами a и c .

Длительность коммутационного интервала

$$\gamma = \beta - \arccos \left(\frac{I_d \cdot X_a}{\sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \frac{\pi}{m}} + \cos \beta \right)$$

Среднее значение противо ЭДС, инвертора

$$E_{d\beta} = E_{d\beta_0} + \Delta U_x$$

где $E_{d\beta_0}$ – противо ЭДС при отсутствии коммутационных процессов (на холостом ходу)

$$E_{d\beta_0} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{7}{6} \pi - \beta \int_{\frac{\pi}{2} - \beta}^{\frac{\pi}{2} + \beta} \sqrt{2} E_2 \sin \theta d\theta = -\frac{\sqrt{2} E_2}{2\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \beta = -1.17 E_2 \cos \beta;$$

ΔU_x – среднее значение прироста противо ЭДС инвертора за счет коммутационных процессов и определяемое величиной заштрихованной площади.

$$\Delta U_x = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\beta}^{-\beta + \gamma} \left(\frac{e_{2c} + e_{2a}}{2} - e_{2a} \right) d\theta = -\frac{I_d \cdot X_a}{2\pi} \cdot \frac{1}{3}$$

Уравнение входной характеристики инвертора

$$E_{d\beta} = -1.17 \cdot \cos \beta - \frac{I_d \cdot X_a}{2\pi} \cdot \frac{1}{3}$$

Так как минимальное значение угла запаса δ ограничено временем выключения тиристора:

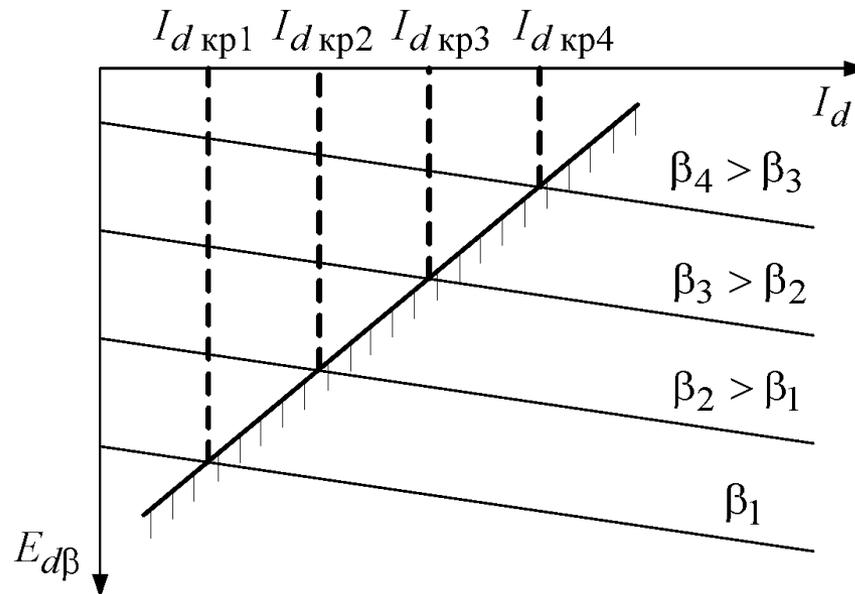
$$\delta_{\min} = \omega \cdot t_{\text{ВЫХ}}$$

то интервал коммутации γ не должен превышать критического значения $\gamma_{\text{кр}} = \beta - \delta_{\min}$

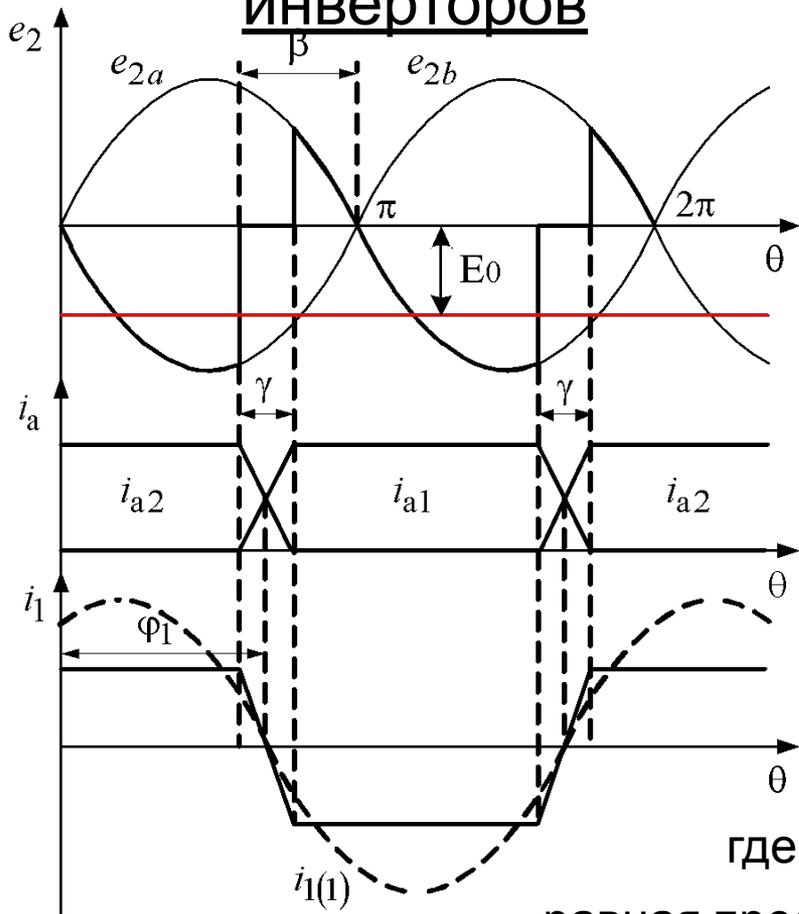
Тогда, критическое значение тока $I_{d\text{кр}}$, и соответствующее ему $E_{d\beta\text{кр}}$:

$$I_{d\text{кр}} = \frac{\sqrt{2}E_2}{X_a} \cdot \sin \frac{\pi}{3} \cdot (\cos \delta_{\min} - \cos \beta) \quad E_{d\beta\text{кр}} = -1.17 \cdot E_2 \cdot \left(\frac{\cos \delta_{\min} + \cos \beta}{2} \right)$$

По полученным выражениям строится ограничительная характеристика инвертора.



Энергетические показатели зависимых инверторов



Фазовый сдвиг φ_1 между $i_{1(1)}$ и напряжением U_1 сети равен:

$$\varphi_1 = \pi - \beta + \frac{\gamma}{2}$$

Следовательно, зависимый инвертор является потребителем реактивной мощности величина которой определяется углом опережения β

$$Q = U_1 I_{1(1)} \sin \varphi_1$$

Полный коэффициент мощности

$$\chi = \frac{P_{и}}{S} = \nu \cos \varphi_1$$

где $P_{и} = U_1 I_{1(1)} \cos \varphi_1$ – активная мощность

инвертора, равная преобразованной мощности источника постоянного тока

$$P_d = E_0 I_d.$$

Коэффициент искажения

$\nu = \frac{I_{1(1)}}{I_1}$ определяется так же, как и в схемах выпрямителей,

– наличием высших гармоник в токе первичной обмотки трансформатора.