

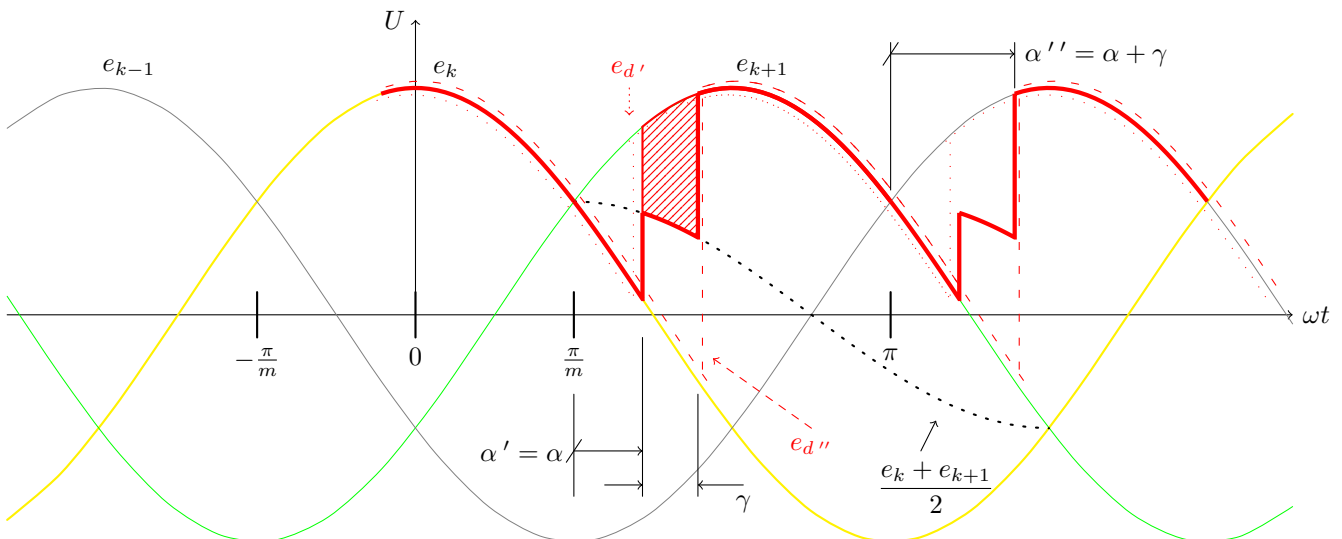
– выпрямленная ЭДС неуправляемого преобразователя




– выпрямленная ЭДС управляемого преобразователя

- Выпрямленное напряжение для угла  $\alpha$ , или максимальное (при  $\alpha = 0$ ).

$U_0$  – напряжение на вентиле,  $R_D$  – дифференциальное сопротивление вентилля.  $r_\phi$  – полное эквивалентное сопротивление фазы с учетом сопротивления сети, приведённого ко вторичной обмотке, сопротивление проводников.

Для точности отметим член  $\frac{\gamma}{4\pi}$ .




Почти в каждом билете будет задачка, в которой придется рисовать. кривую  можно получить как полусумму двух кривых  $e_{d'}$   и кривой  $e_{d''}$  .

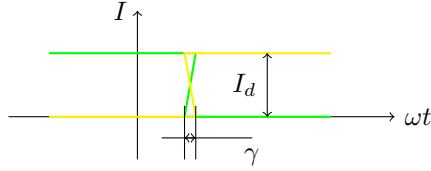
В прошлый раз было убедительно доказано, что при соединении двух ЭДС с равными внутренними сопротивлениями суммарная ЭДС будет полусуммой этих ЭДС.

Из-за индуктивности ток в  $k$ -й фазе спадает с конечной скоростью, а в  $k+1$ -й нарастает с конечной скоростью. Разность ЭДС  $e_{k+1} - e_k$  падает



на сопротивлении. Площадка  показывает падение напряжения из-за индуктивности фазы. Напомню,  $X_\phi = 2\pi f L_\phi$  (индуктивность это

величина отношения  $\frac{\text{потока}}{\text{к току}}$ , где магнитный поток—это магнитный поток рассеяния, обусловленный током нагрузки, а не током намагничивания.



Делали допущение  $i_d = I_d$  — мгновенное равно среднему, пульсаций нет. Уменьшить пульсации до нуля мы не можем, но уменьшить до уровня, когда пульсациями можем пренебречь технически возможно.

Мгновенное значение ЭДС при угле регулирования  $\alpha$  и угле коммутации  $\gamma$  представим в виду полусуммы

$$e_{\alpha, \gamma} = \frac{e_{\text{.....}} + e_{\text{---}}}{2} = \frac{e_{d'} + e_{d''}}{2} =$$

Это значит, что каждая из них кривая мгновенного напряжения у которого нет  $\gamma$ .

$$= \frac{e_{d'}(\alpha' = \alpha, \gamma' = 0) + e_{d''}(\alpha'' = \alpha + \gamma, \gamma'' = 0)}{2} =$$

--- — при угле  $\alpha'' = \alpha + \gamma$

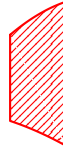
$$E_d(\alpha, \gamma) = \frac{E_{d'}(\alpha, \gamma = 0) + E_{d''}(\alpha'' = \alpha + \gamma, \gamma'' = 0)}{2}$$

Для чего это делаем. Нужно проинтегрировать на интервале повторяемости

$$E_d = \frac{E_{d0} \cos \alpha' + E_{d0} \cos \alpha''}{2} = E_{d0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}$$

$$E_d = E_{d0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}$$

Проанализируем результат. На каждом интервале повторяемости теряем



эту площадку  $-\Delta E_d$  — разница между  $e_{d'}$  и  $e_{d''}$

$$E_d = E_{d0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} \quad (4)$$

$$\Delta E_d = \underbrace{E_d(\alpha, \gamma = 0)}_{\text{без коммутации}} - \underbrace{E_d(\alpha, \gamma \neq 0)}_{\text{при реальном } \gamma}$$

Смотрим внимательно на уравнение (3) где учтено  $\Delta E_d$ . Отметим  $X_\phi$  — падение на индуктивности. Кажущаяся нелепость: Постоянный ток

умножается на индуктивность. Это есть ЭДС самоиндукции  $\frac{m}{2\pi}X_\phi I_d$  – коммутационное. В учебниках пишут  $\Delta U$ , у нас написано  $E$ , подчеркивая что природа этого – падение на самоиндукции.

$$\Delta U_{d\gamma} = \Delta E_{d\gamma} = E_{d0} \frac{\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)}{2} = \frac{m}{2\pi}X_\phi I_d \quad (5)$$

Коэффициент  $R_K = \frac{m}{2\pi}X_\phi$  мы умножаем на ток нулевой частоты. Это фикция, но так говорят, мы упоминаем шутка ради. Но это сопротивление не греется от проходящего тока, поэтому оно фиктивное.

Из предыдущего (5) уравнения можем найти  $\gamma$

$$\gamma = \arccos \left[ \cos\alpha - \left( \frac{\frac{m}{2\pi}X_\phi I_d}{E_{d0}} \right) \right] - \alpha \quad (6)$$

В уравнении (5)  $\Delta U_{d\gamma}$  индекс  $\gamma$  подчёркивает, что это падение напряжения вследствие угла коммутации  $\gamma$

$$\gamma = \arccos \left[ \cos\alpha - 2 \left( \frac{\Delta U_{d\gamma}}{E_{d0}} \right) \right] - \alpha \quad (7)$$

$$\gamma = \arccos \left[ \cos\alpha - \left( 2 \frac{R_K I_d}{E_{d0}} \right) \right] - \alpha \quad (8)$$

где

$$R_K = \frac{m}{2\pi}X_\phi \quad (9)$$

Еще раз перепишем формулу (3):

$$U_d = E_d - U_0 - I_d [R_K + R_{\text{эквивалентное}}]$$

При практических расчётах приближённо  $U_0$  мало, также пренебрегают влиянием  $\gamma$  на коммутационное сопротивление.

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - I_d \left( R_K + \underbrace{r_\phi}_{\text{на стороне переменного тока выпрямителя}} + \underbrace{R_\Phi}_{\text{на стороне постоянного тока выпрямителя}} \right)$$

Эту формулу применяют для практических расчётов.

$$R_K = \frac{m}{2\pi}X_\phi - (r_\phi + R_D) \frac{\gamma}{4\pi}$$

– эта формула для совсем точных расчётов. Активное сопротивление на постоянном токе уменьшается.

Уравнение (3) – статические характеристики. В статическом режиме  $\alpha$  и  $I$  не меняются. То что присутствует  $\gamma$  – его нужно исключить, решив уравнение относительно  $\gamma$

$U_d = F(\alpha, I_d)$  – можно рассматривать уравнение как функцию двух переменных.

$U_d = f(\alpha)$  при  $I_d = \text{const}$  – **регулируемые характеристики**.  
Почему во множественном числе? потому что для разных  $I_d$ .

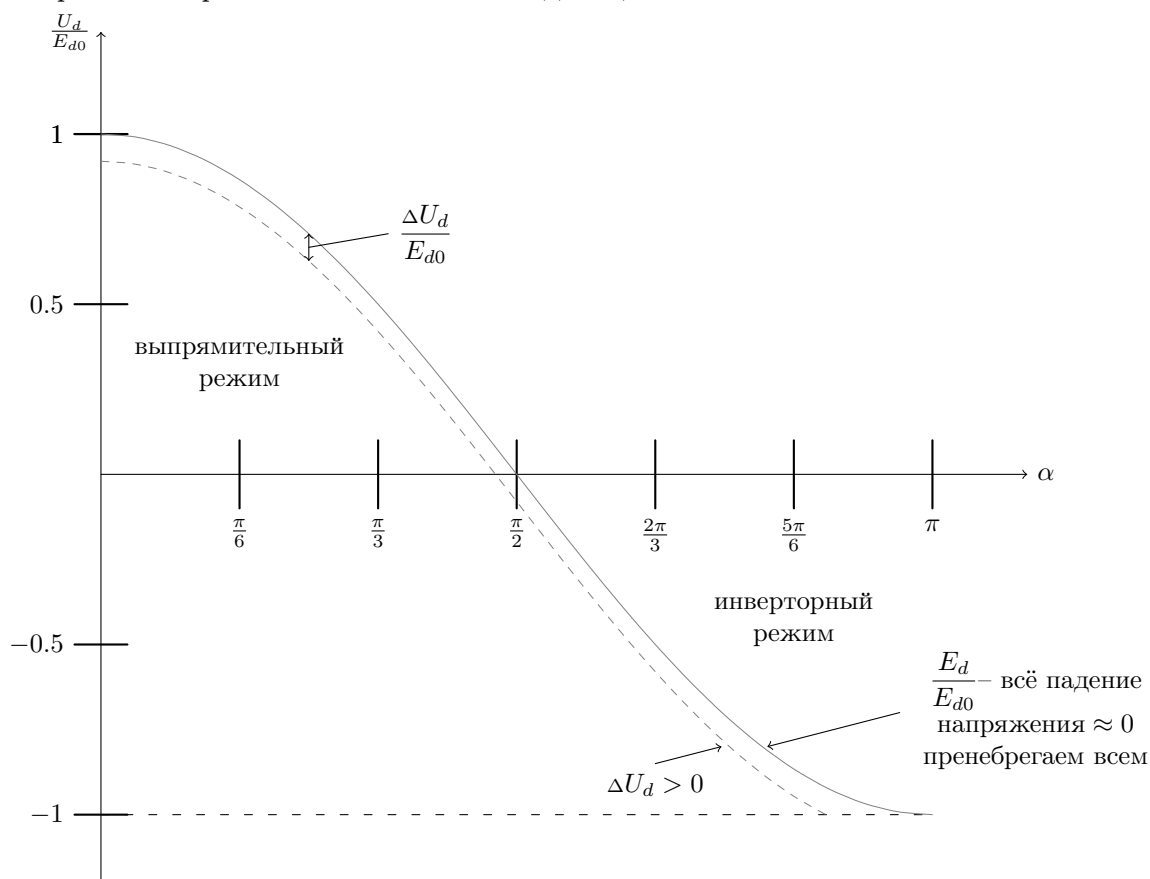
$U_d = f(I_d)$  при  $\alpha = \text{const}$  – **внешние характеристики**.

Как их строят? Строят семейство регулировочных характеристик и семейство внешних характеристик.

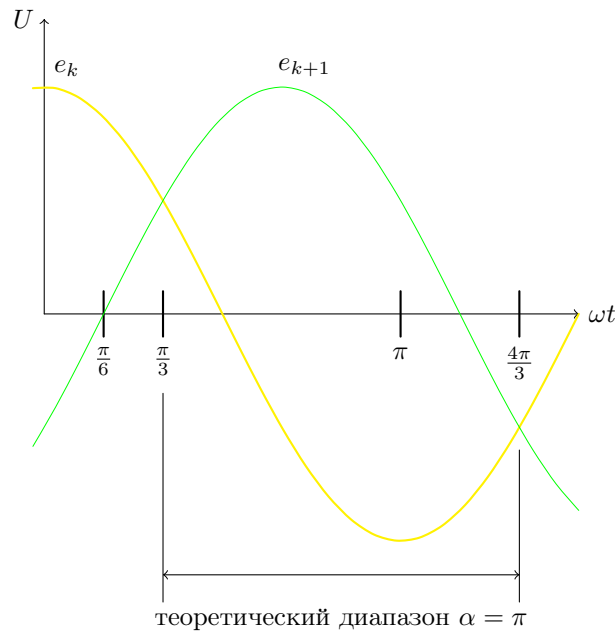
При  $I_d$  малых (пренебрегаем падением на внутренних элементах).  
Это одна из регулировочных характеристик, причём основная, а внешних – много.

### 0.0.1 регулировочные характеристики

характеристики строятся в относительных единицах.



$\alpha \geq 0$ , потому что не сможем включить раньше. Какой теоретический



предел  $\alpha$

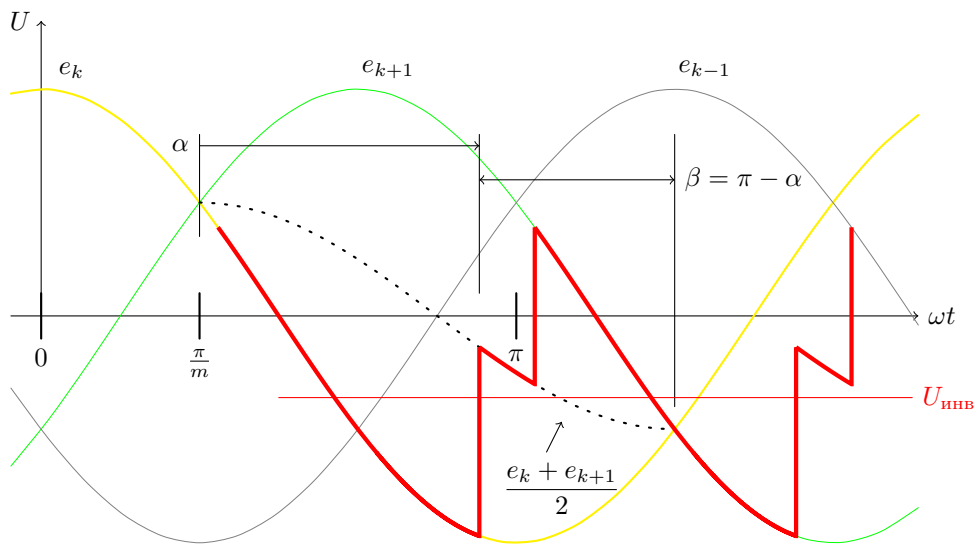
Обычно строят графики  $I_d \approx 0$  и  $I_d \approx I_{\text{номинальный}}$  (близко к номиналу).

Падение  $\leftarrow \frac{\Delta U_d}{E_{d0}}$  – единицы процента, до 10%. 30% быть не может, поскольку, 15% падение на реактивных и 15% падение на активных сопротивлениях, а 15% потерь недопустимо для КПД выпрямителей. У выпрямителях КПД  $\approx 95\%$ .

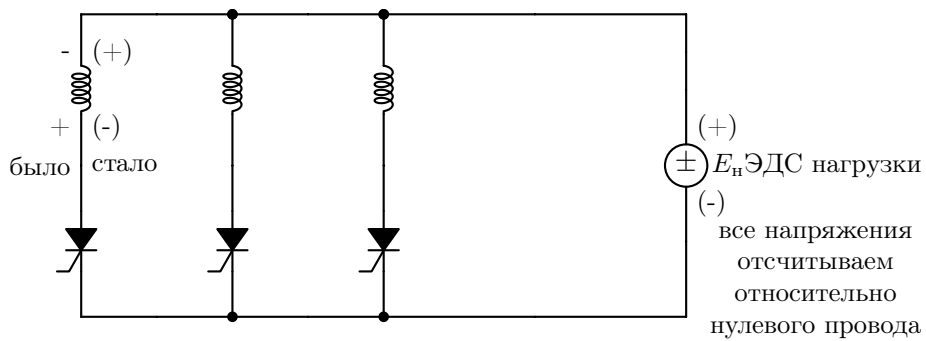
Выпрямленное напряжение становится меньше 0, как это понять?  $I > 0$  всегда. Это не диод,  $\alpha \neq 0$ , это тиристор.  $I \cdot U < 0$ , значит преобразователь преобразует в обратном направлении. И КПД  $\neq 95\%$ , потом поговорим об этом подробнее.

Когда  $U \approx 0$ , напряжение примерно 10% от номинала, КПД уменьшается не потому что увеличиваются потери, а потому что уменьшается мощность.

$P_d = U_d I_d < 0$  – инверторный режим. Инверторный режим преобразователя обычно имеет место когда  $E_d < 0$  и  $\alpha > 90^\circ$ .



За счет чего течёт ток?



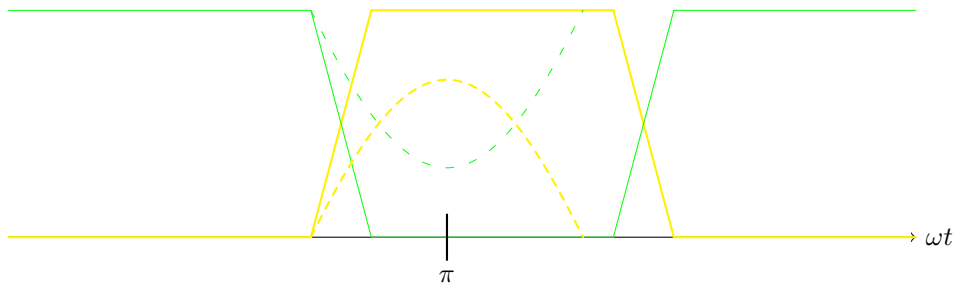
Все напряжения отсчитываются относительно нулевого провода и поэтому ток течёт за счёт ЭДС нагрузки!

$\alpha$  двигаем дальше, от этого положительная часть уменьшается, а отрицательная увеличивается. Если энергия течёт в сеть, значит  $\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} e_n$ .

Теперь рисуем картинку при  $\alpha > 90^\circ$  Введем угол  $\beta$ :

$$\beta = \pi - \alpha$$

$\alpha$  – угол запаздывания,  $\beta$  – угол опережения. Рисуем ток.



$\beta > 0$  Если не выключить  $k$ -й вентиль до точки пересечения, то он уже никогда не выключится. Если  $L$  большая, коммутация не кончится. Темп изменения тока пропорционален ЭДС. Но ЭДС, а значит и скорость нарастания тока уменьшаются, а дальше скорость станет отрицательной, а значит, коммутация не будет продолжаться.

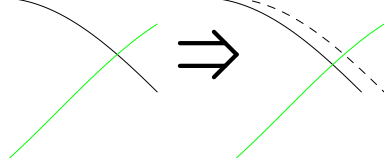
Коммутация вентиля должна закончиться до момента отсчета угла  $\beta$ . В противном случае переключения фаз не произойдет.  $\beta$  не просто больше 0, а  $\beta > \gamma$ . Предположим, что разность  $\beta - \gamma$  мала. Сравним её со временем выключения вентиля. Вентиль может самопроизвольно включиться  $I \approx n$  носителей.  $I$  убывает, но рекомбинации носителей не произошло (вентиль не восстановился).  $\beta - \gamma >$  времени запираания тиристора.  $\omega t_{\text{выкл}} = \sigma$  – угол запираания или выключения вентиля.

$\beta > \gamma + \sigma$  – каждый раз условие увеличивается.

Практически, учитывается наличие несимметрии напряжения сети, несимметрии углов регулирования  $\alpha$  (несимметрия СИФУ), с учётом несинусоидальности и разброса параметров тиристора необходим запас по углу для устойчивой работы инвертора ( $\psi$  – угол запаса)

$$\beta \geq (\gamma + \beta + \psi) = \beta_{\min} \quad (10)$$

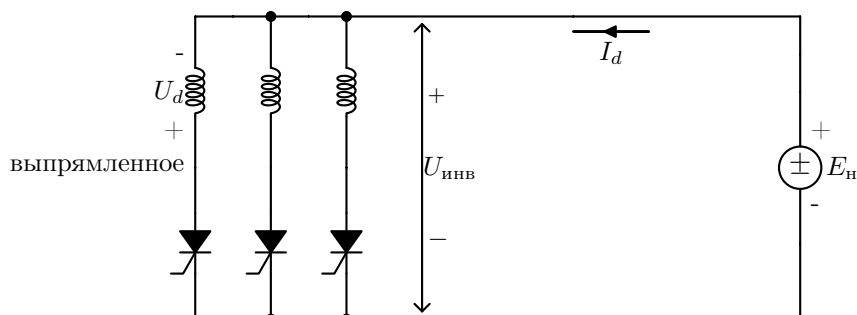
– условие устойчивой работы инвертора. отсюда,  $\alpha_{\max} = \pi - \beta_{\min}$



Если сместилась фаза,  $\beta$  тоже сместилась.

Несимметрия СИФУ - средний угол 18,22. Там где не хватает  $\beta$ . Несинусоидальность фазы - опять приводит к необходимости увеличить  $\beta$ . От температуры, тока, который был, напряжение приложенное.  $\Delta\alpha + \Delta\phi$  – несимметрия сети +  $\Delta\phi$  – несинусоидальность +  $\Delta$  (разброс на углы включения). Эмпирически  $\beta_{\min} = 15...30^\circ$ ,  $\alpha_{\max} = 150, 165^\circ$  К чему приведет невыполнение (10)? Невыполнение (10) может привести к “опрокидыванию” инвертора: вместо инвертора получим выпрямительный режим – аварийный режим, связанный с переходом преобразователя в выпрямительный режим с резким возрастанием выпрямленного тока. Выпрямленный ток может

возрастать до значений, близких к току К.З, Иногда называют током “двойного” К.З., т.е. к К.З. одновременно и преобразователя и источника.



$$I_d = \frac{\overbrace{E_n}^{\text{согласно с током}} - \overbrace{|E_d|}^{\text{само отрицательно}}}{R_n + R_{\text{эквив}}}$$

Была разность ЭДС, а станет сумма.  $U_{\text{инв}}$  – аккумулятор, выпрямитель, солнечная батарея.  $R$  – маленькая,  $R_n - 5\%$  и если напряжение не в плюсе а в минусе, то в 19 раз вырастет ток. Получаем КЗ и для инвертора и для нагрузки. Не двойной ток, а “удвоение” явления. А ток  $I \approx I_{\text{К.З.}}/2$ .

Опрокидывание инвертора приводит к аварийному отключению преобразователя. А есть и электронные средства.

Инверторный режим принципиально менее надежен чем выпрямительный режим.

Опрокидывание инвертора может происходить в случае

- кратковременного исчезновения или резкого уменьшения напряжения питающей сети;
- в случае пропуска (даже одиночного) управляющего импульса.
- в случае ложного несвоевременного срабатывания (даже одиночного) какого-либо вентиля.

4 причины: 1) – невыполнение условий. пропустили импульс – пропал контакт. Ложное отпирание может произойти вследствие сбоя СИФУ – ток растет лавиной.

Где используется инверторный режим.

Солнечные батареи –  $\leftarrow; =$ . Где инверторы крайне необходимы. Гидрогенераторы мощностью 100МВт возбуждаются с помощью 10МВт. Для управления генераторами а обмотке возбуждения гигантская магнитная энергия, её и нужно передать в сеть. Для включения-выключения генератора требуется форсировка в 5-8-14 раз. На синхронных компенсаторах в 10-13 раз, 1300В вместо 100в. И такая же скорость снижения должна быть.

Отключение линий. Разгон – выпрямительный режим, Самое экономное торможение – рекуперация, инверторный режим.



### 0.0.2 Прерывистый режим работы преобразователя

Режим прерывистого выпрямленного тока. Ток нагрузки, правильный ток  $I_d$ . А если он(ток)  $I_d$  начинает прерываться – это прерывистый режим. Пульсация большая. 1й случай – это нонсенс. А вторая ситуация, когда ток маленький и ток сравним с пульсацией.

$$\frac{E_d - E_n}{R_\Sigma} = I_d$$

В этой формуле  $I_d$  – постоянный, варьируется за счет  $E_d - E_n$ .

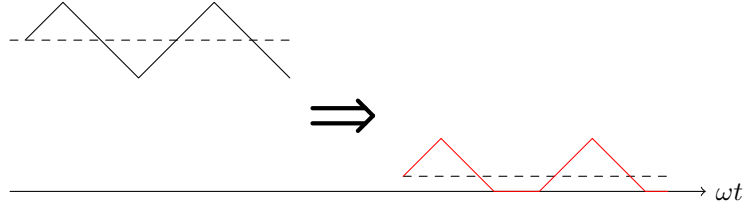
$$e_d = E_d + (e_d) = const$$

$\alpha$  не меняется.

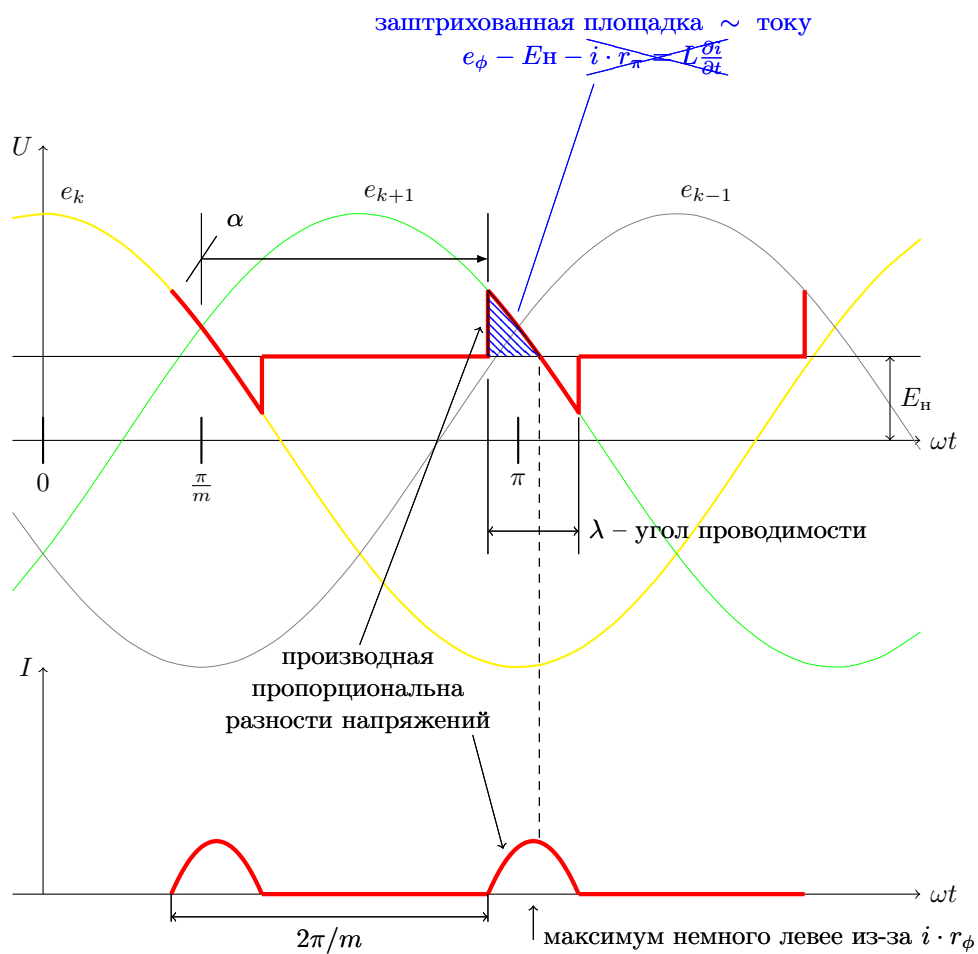
$$\frac{(e_d)}{\text{переменная "Z''}} = const$$

а ток разложить в ряд Фурье.

Двигатель в холостом режиме  $E_{\text{двиг}} \approx E_{\text{источника}}$



Пересечь “нуль” не может, потому что тиристоры не проводят ток в обратном направлении. Такая ситуация бывает в при работе двигателя режиме Х.Х. Ток плохой(маленький), но управлять двигателем нужно и в этом режиме. Для установок, например, для того чтобы вывести двигатель в нужную точку (позиционирование x,y), это может иметь важное значение.



Если бы не было  $i \cdot r_\phi$ , то максимум тока был бы где  $U = E_n$  (производная в точке максимума равна 0).

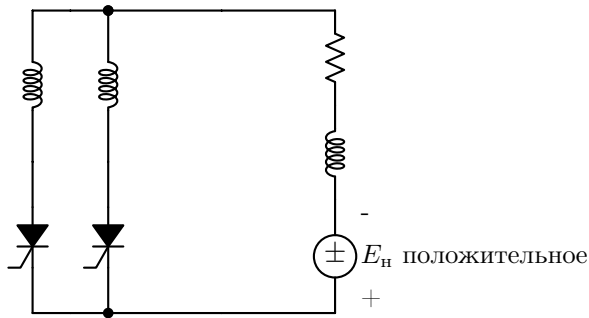
Угол проводимости  $\lambda$  – угол, в течении которого ток больше 0.

Никакого угла коммутации не будет. Ток проводит – пауза – проводит следующий вентиль.

Постоянная ЭДС нагрузки

$$\underbrace{E_d + (e_d)}_{\text{выпрямленное}} - E_n = \underbrace{L \frac{\partial i_d}{\partial t} + R_\Sigma i_d}_{\text{и нагрузка и преобразователь}}$$

$U_0$  включили в  $E_n$ . Разность  $E_d + (e_d) - E_n$  больше 0, чтобы протекал ток.



В паузе будет ЭДС нагрузки, все вентили выключены.

$$U_d = \frac{1}{2\pi/m} \left[ \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{-\frac{\pi}{m} + \alpha + \lambda} \sqrt{2} E_{2\phi} \cos(\omega t) d\omega t + E_n \left( \frac{2\pi}{m} - \lambda \right) \right] =$$

$\lambda < \frac{2\pi}{m}$  – означает, что ток прерывистый.

$\lambda > \frac{2\pi}{m} \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{m} + \gamma$  – режим непрерывного тока.

при  $\lambda = \frac{2\pi}{m}$  – граница, должны сливаться оба режима, сливаются на отрезке длиной  $\gamma = 0$ .

$$= \frac{m}{2\pi} \sqrt{2} E_{2\phi} \left[ \sin \left( -\frac{\pi}{m} + \alpha + \lambda \right) - \sin \left( -\frac{\pi}{m} + \alpha \right) \right] + E_n \left( 1 - \frac{\lambda m}{2\pi} \right) =$$

$$\frac{m}{2\pi} \sqrt{2} E_{2\phi} \sin \frac{\lambda}{2} \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{m} + \frac{\lambda}{2} \right) + E_n \left( 1 - \frac{\lambda m}{2\pi} \right) =$$

$$U_d = E_{d0} \frac{\sin \frac{\lambda}{2}}{\sin \frac{\pi}{m}} \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{m} + \frac{\lambda}{2} \right) + E_n \left( 1 - \frac{\lambda m}{2\pi} \right)$$

$\lambda = \frac{2\pi}{m}$  – граничный режим  $\frac{\pi}{m}$ ?

Частный случай режима работы управляемого преобразователя на чисто активную нагрузку.

$$= \int_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\pi}{2}}$$

а если  $\alpha = 0$  – тогда не будет прерывистого режима. Прерывистый режим будет в случае когда  $\alpha > 0$

$$\underbrace{\frac{\pi}{m} + \alpha}_{\text{момент включения}} > \frac{\pi}{2}$$

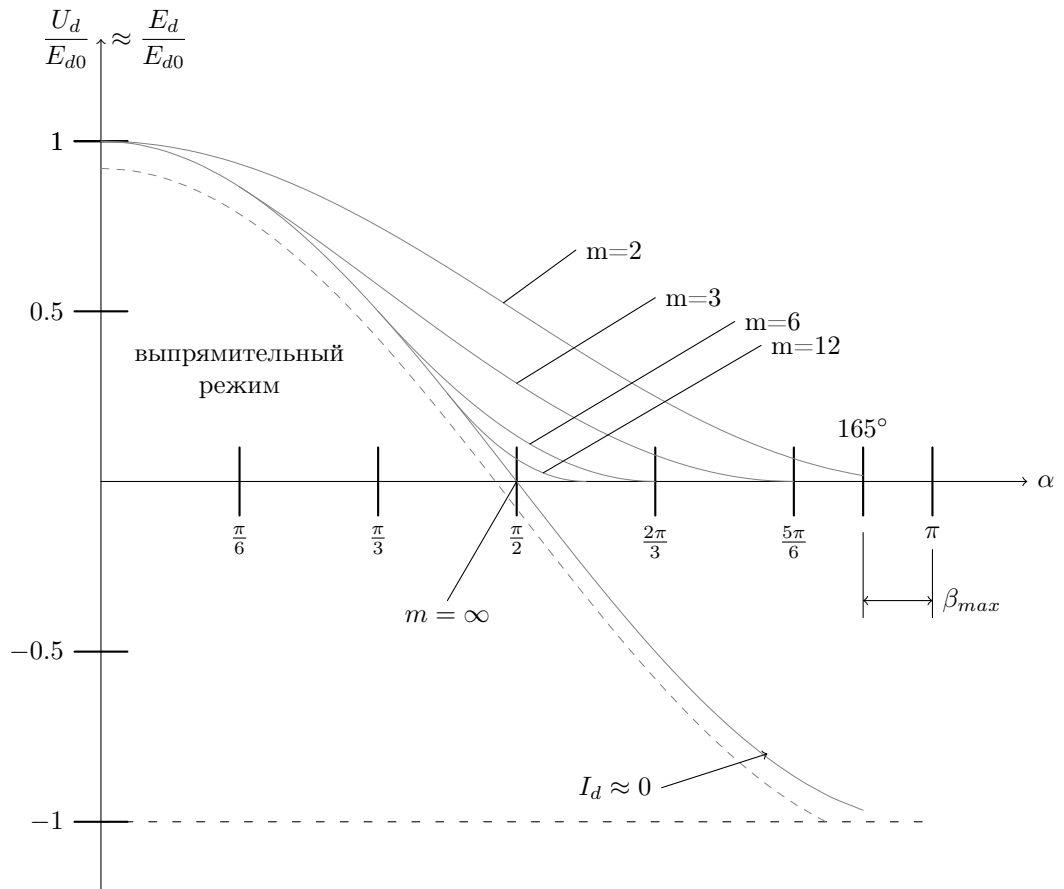
момент включения  
следующей фазы

Должно выполняться неравенство, иначе нет прерывистого режима.

$$\frac{m}{2\pi} \sqrt{2} E_{2\phi} \left[ 1 - \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{m} \right) \right] = E_{d0} \frac{1 - \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{m} \right)}{2 \sin \frac{\pi}{m}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \alpha &> \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \\ \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} &< \alpha < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} \end{aligned} \quad (12)$$

для разных  $m$  разные неравенства (12)

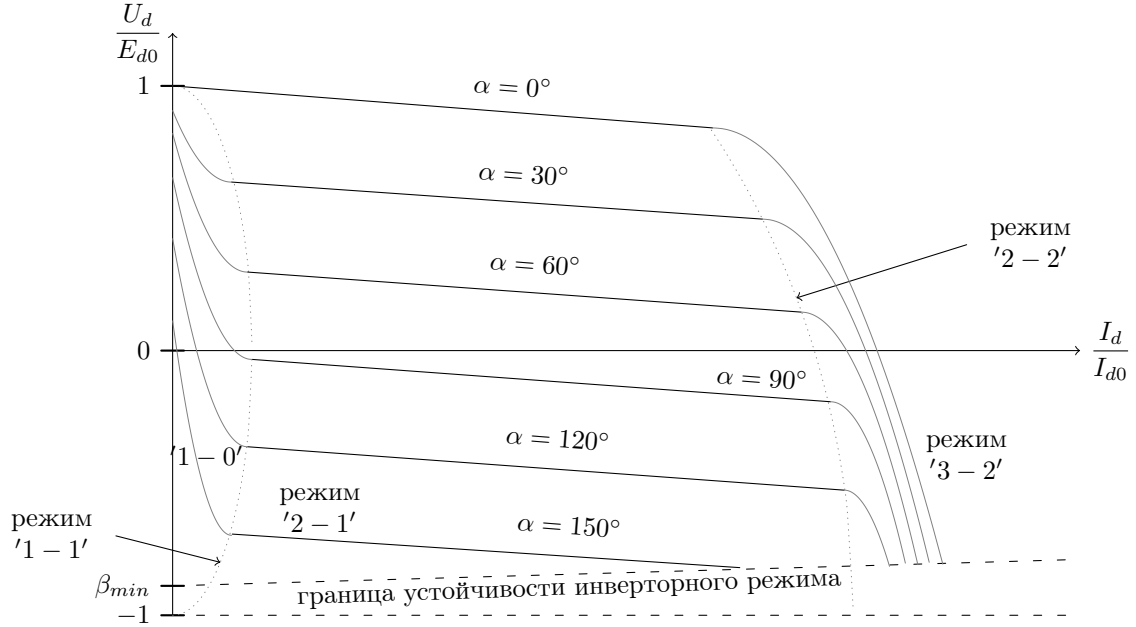


Если  $\alpha < \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$  тогда это непрерывный режим. При  $m = 2$  прерывистый режим начинается как только  $\alpha > 0$ .

$$m = 2 \quad E_d = \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$m = 3 \quad \text{до } 30^\circ \text{ справедлива синусоида, затем } E_d = 1 - \sin(\alpha)$$

### 0.0.3 Внешние характеристики $\alpha = \text{const}$



$$\beta_{min} = \gamma + \delta + \psi$$

Если тока нет, то нет  $\gamma$  и  $\delta$ , остается одна  $\psi$ . С ростом тока  $I$  растет  $\gamma$  и  $\delta$ . Максимальные пульсации  $U$  при  $\alpha = 0$ . На границе прерывистого режима среднее напряжение примерно равно пульсациям.  $\lambda = \frac{2\pi}{m}$  – граничный режим. Справа справедливо уравнение (3) Кривые близки к прямой линии до прерывистого, граничного режима. Режим “1-0”  $0 < \lambda < \frac{2\pi}{m}$  – прерывистый режим, проводит один клапан “1”, затем он выключается “-0” – никто из клапанов не проводит.

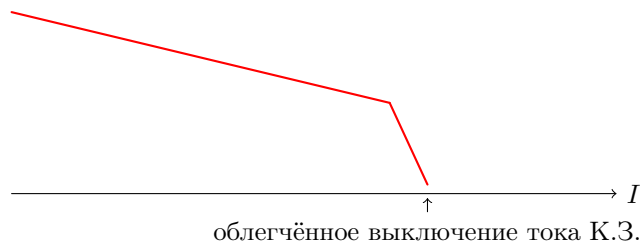
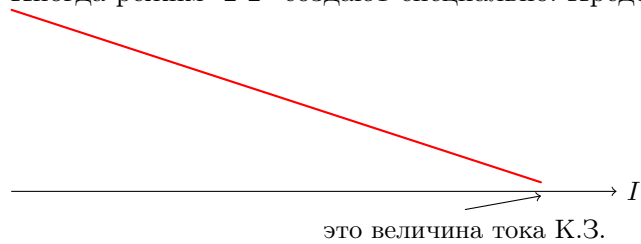
$$\begin{aligned} \text{“1 – 1”} \quad \lambda &= \frac{2\pi}{m} && \text{– граничный режим} \\ \text{“1 – 2”} \quad \frac{4\pi}{m} > \lambda > \frac{2\pi}{m} && \text{– двухклапанная коммутация} \end{aligned}$$

Рассмотрим общий случай многофазного  $m \geq 6$  преобразователя. Основной режим – режим двухклапанной коммутации. При больших токах и больших  $L$

$$\begin{aligned} \text{“2-2”} &- \lambda = \frac{4\pi}{m}; \\ \text{“2-3”} &- \frac{4\pi}{m} < \lambda < \frac{6\pi}{m}; \end{aligned}$$

Это были характеристики для нулевых схем. В мостовых схемах происходит коммутация: одна половина моста взаимодействует с другой половиной моста.

Иногда режим “2-2” создают специально. Представим К.З.



#### 0.0.4 реверсивные преобразователи

Ток только справа, отрицательного тока быть не может.

	$U \cdot I$	$\omega \cdot M$
отрицательная	электрическая	механическая
	мощность	мощность

Двигатель постоянного тока:

$$E_{\phi} = \omega C_{\phi}$$

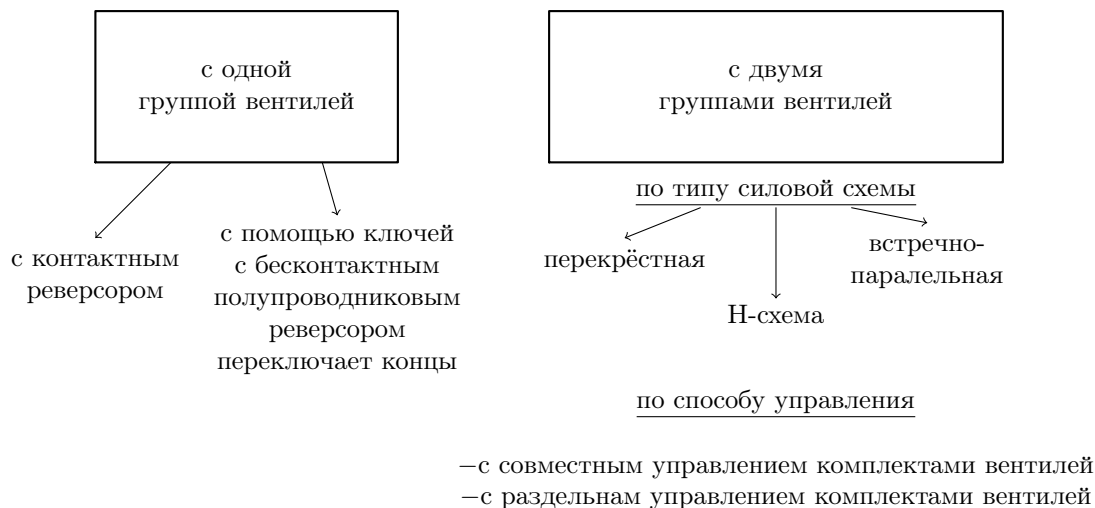
$$M_{\text{эм}} = C_{\phi} I$$

$$C_{\phi} = \frac{pN}{2\pi a}$$

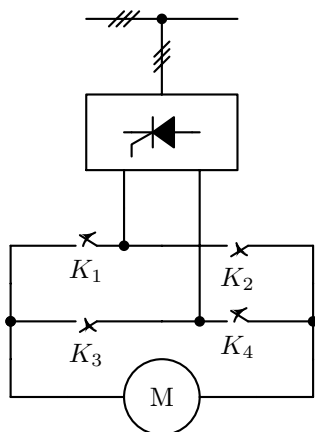
здесь  $p$  – количество полюсов,  $N$  – число активных...,  $a$  – число параллельных ветвей.

Положительный ток, отрицательный момент. Не дай бог двигатель постоянного тока потеряет возбуждение  $\Phi \downarrow \omega \uparrow$  Если  $\Phi \downarrow$  10-кратное форсирование в 10 раз дороже. Применялось при ртутных вентилях, с 20В падением в дуге, и охлаждением. С реверсом поля якоря тогда пытались <сделать> реверсивный поток. Лучше сделаем отрицательный ток.

## 0.0.5 классификация реверсивных тиристорных преобразователей



## 0.0.6 Контактный реверсор



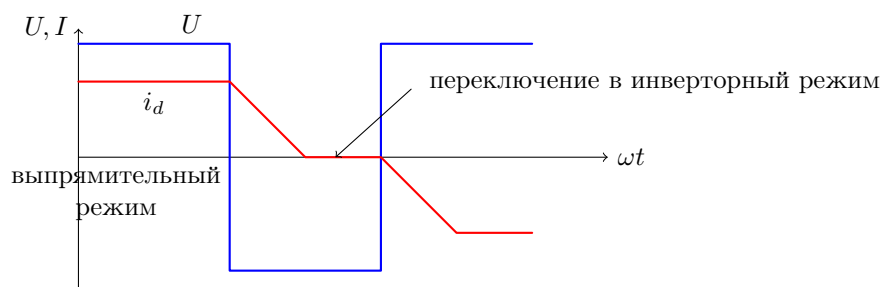
Если включены  $K_2$  и  $K_3$ , ток течет через двигатель справа налево  $\Leftarrow$ ,  
 Если включены  $K_1$  и  $K_4$ , ток течет через двигатель слева направо  $\Rightarrow$ .

Как разорвать, возникает дуга. На переменном токе энергия  $\uparrow\downarrow$ . Дуга затухает, когда переменный ток перейдет через 0.

Для преобразователя уменьшим средний ток до 0, и в этот момент перебросим контакты.

Переключение инверторов





### 0.0.7 бесконтактный ключ

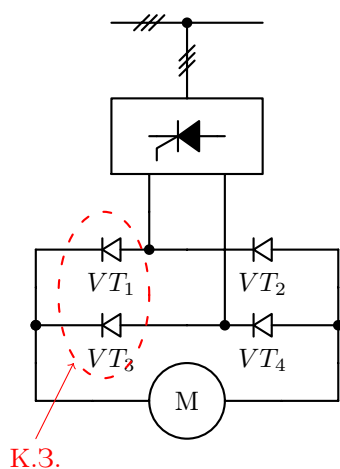


Схема включения ключей аналогична контактному реверсору.  $VT_1$ – $VT_4$  и  $VT_2$ – $VT_3$ . Необходимо сделать паузу чтобы не были включены одновременно  $VT_1$  и  $VT_3$  иначе произойдет короткое замыкание. Недостатки – сэкономил 1 тиристор, а купил 4. Схема применяется для малой мощности, для возбуждителей, для гальваники. В гальванике технологически требуется снять-нанести покрытие. Тренировка аккумуляторов. В линиях постоянного тока происходит реверс мощности а не реверс тока.