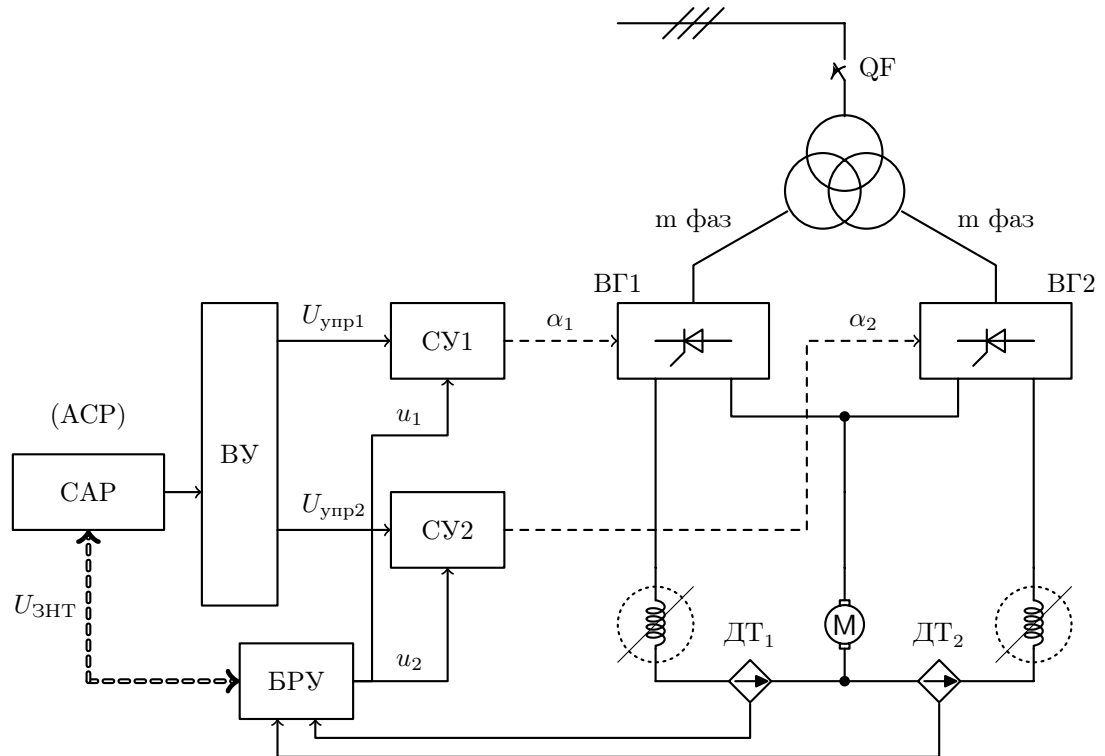
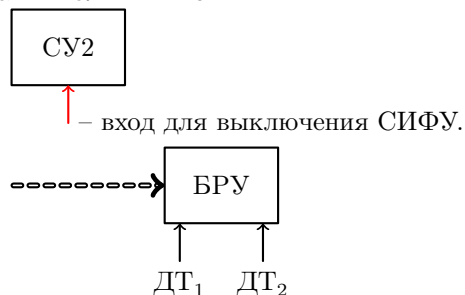


Завершаем рассмотрение реверсивных преобразователей.

0.0.1 Функциональная схема раздельного управления



Трансформатор имеет особенность преобразовывать число фаз. У каждой вентильной группы (ВГ) своя система управления СИФУ (СУ) или система управления вентилями (СУВ). Каждая SU_N генерирует сигналы с углом α_N . Импульсов должно быть m . Уравнительные реакторы используются только в случае совместного управления. На схеме уравнительные реакторы обведены кружками, чтобы подчеркнуть, что в раздельном управлении они не обязательны. При совместном управлении должно выполняться условие $\alpha_1 + \alpha_2 > \pi$, в противном случае протекает большой уравнительный ток.



БРУ – блок раздельного управления. Токи управления от датчиков

тока ДТ₁ и ДТ₂ (10-100mA, max 10-15V). БРУ \equiv ЛПУ – он же логическое переключающее устройство. Стрелкой \dashrightarrow обозначен сигнал инициирующий работу (вначале отключить, затем включить после паузы).

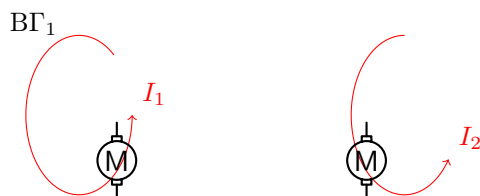


Рис. 1: направление тока

Одновременно токи I_1 и I_2 не могут существовать, должна быть пауза, чтобы тиристоры выключились.

Для измерения переменного тока существует трансформатор тока, изолированный от силовой цепи. Существуют “трансформатор постоянного тока” построенный на принципе подмагничивания. Чаще всего используется токоизменительный шунт. Исторически шунты рассчитывались на протекание тока $45mV$, в настоящее время рассчитываются на $75mV$. С помощью шунта превратили сигнал тока в напряжение. Чтобы не было ошибок в динамике нужно чтобы шунт был безиндуктивный. Представим, что через преобразователь проходит ток $10kA$, или $1000A$, тогда даже милливольты превращаются в большее ватты.

Заострим проблему: Сумма токов утечек например 10 включенных параллельно вентилей может превысить ток удержания. Выключаются вентили последовательно, и наконец остается один последний вентиль в котором

$$\begin{array}{rcl} 10kA & - & 75mV \\ 10mA & - & \end{array}$$

величина может превысить порог чувствительности для удержания одного.

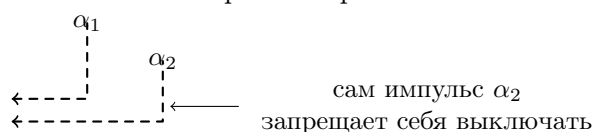
(АСР) – автоматическая система регулирования по ГОСТу. (САР) – система автоматического регулирования.



– сигнал заданного направления тока, тоже логический (0 или

1) Отключать можно тогда, когда $I = 0$. Увеличиваем α , ток I падает до нуля, в этот момент БРУ отключает импульсы, и это же побудительный момент для перемены направления тока. Не показаны выдержки времени.

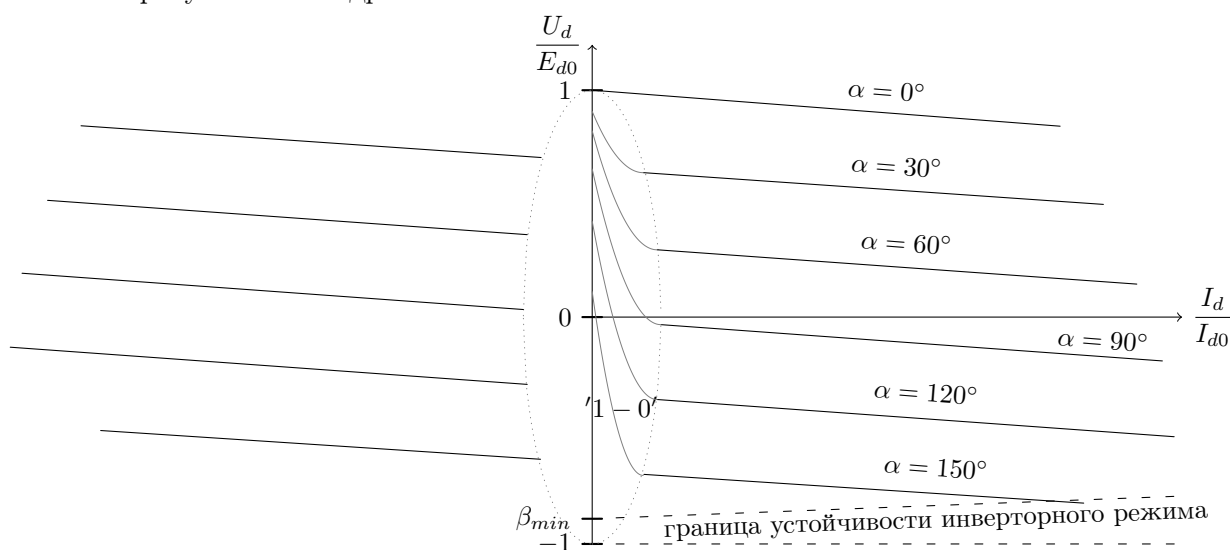
Кроме того есть запрет на переключения в момент формирования импульсов



функция необязательная но часто используемая. Ненадежность токовой логики шунта с усилителем. Возникает проблема: ток перегрузки двигателя 250% номинала. Контролируемый ток 1/1000 доля номинала. Вместо датчика тока используются датчики напряжения 1-2...4В – падение напряжения в открытом состоянии. Вместо датчика тока используются датчик запертого состояния тиристора. Бывает, что датчик говорить “0”, но это может оказаться переменный ток проходящий через нуль. Схемы управления бывают аналоговыми, цифроаналоговыми. Когда система управления реализуется аппаратно нужны ли две системы управления. У трансформатора не работает. Убрали уравнивательные реакторы, для этого и была нужна система раздельного управления, чтобы оптимизировать. Зачем два СИФУ? Аппаратно и программно алгоритм может быть выполнен с одной СУ. Тогда вместо двух систем импульсов (включения и выключения) используется переключатель между двумя СИФУ. Если СИФУ одно, $\alpha_1 \downarrow \alpha_2 \uparrow$ (переключение и на выходе и на входе). Обязательно должен предусмотреть переключение на входе.

0.0.2 Внешние характеристики реверсивных преобразователей

До этого рисовали внешние характеристики в 2х квадрантах, сейчас нарисуем в 4х квадрантах



Говорили, что область внутри эллипса это область прерывистого тока. По умолчанию все углы в радианах. $\beta_{min}(\gamma, \delta, \psi)$, $\alpha_{max} = 150^\circ - 160^\circ$. Забыли про правую полуплоскость. На левой — другой преобразователь. По отношению к нагрузке этот преобразователь включён “наоборот”?

Симметрично относительно начала координат внешние характеристики реверсивных преобразователей с раздельным управлением.

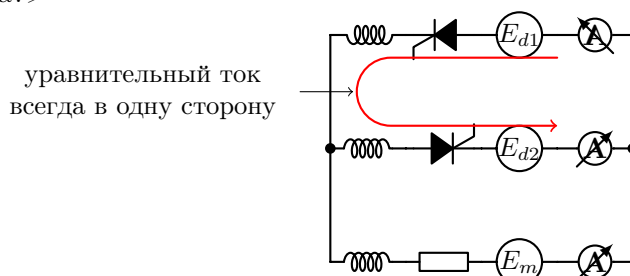
А что с совместным управлением? $\alpha_1 + \alpha_2 > 180^\circ$. Не учёл падение

от активных сопротивлений и U_0 и не рисуем область многовентильной коммутации.

При совместном управлении различают два способа управления:

- совместное согласованное $\alpha_1 + \alpha_2 \approx \pi$ с максимально доступной точностью.
- совместное несогласованное, когда $\alpha_1 + \alpha_2 > \pi$

В инженерном плане равенство $= \pi$ невозможно точно измерить и оно легко может нарушиться из-за нестабильности. Если же заведомо не стремиться к равенству нулю, тогда будет заведомо большой уравнильный ток. <Если импульсы не отключаются то правая ЭДС присутствует слева?>



Уравнильный ток всегда идет минуя нагрузку. Рассмотрим пример

60A ←
80A →
20A ←

Какой уравнильный ток? Уравнильный ток равен 60A

350A ←
90A →
260A →

Меньший из двух вентильных токов – уравнильный. А разность есть ток нагрузки. Увеличили угол значит падение напряжения на вентидлях уменьшились? Уравнильный ток большой, значит углы раздвигаются.

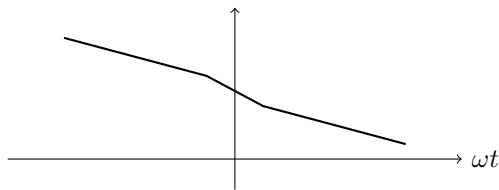
Совместное управление не миф, а может быть реализовано достаточно точно.

На графике изображен ток в нагрузке, но есть уравнильный ток.

Для реверсивного преобразователя

Внутри эллипса ток собственно в вентильной группе.

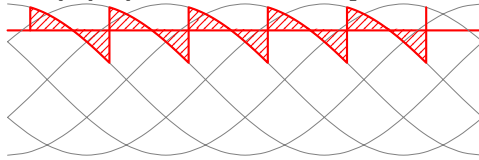
Поэтому характеристики спрямляются



Дадим оценку тому что прошли: совместное управление мы его обругали, но есть спрямление характеристик в области малых токов. В теории автоматического управления электроприводами. Нужен измеритель уравнительного тока. В одной вентильной группе сумма уравнительного тока плюс нагрузка, в другом только уравнительный ток. Спрявление характеристик – достоинство совместного управления.

0.0.3 Пульсации выпрямленного напряжения и тока

Выпрямленное с дефектами, пульсациями. Нужно количественно оценить амплитуду пульсаций. Как определить амплитуду переменной составляющей?



Можно представить рядом Фурье m-пульсаций.

$$f_{\text{гармоники}} = k(mf_c)$$

где $k = 1...k...$, f_c – частота сети

Найдем U_k гармоники.

При $m = 6$, $f_c = 50\text{Гц}$

$$\begin{aligned} f_{\text{гармоники}} &= 300 \\ &600 \\ &900 \\ &1200 \end{aligned}$$

Допустим, мы знаем как выбрать фильтр? Нам нужно фильтровать гармоники тока, а не гармоники U . Зная U_k найти I_k , затем сложить. Неблагодарная задача. Обычно берут первую гармонику, учитывают с коэффициентом запаса.

$$E_{dkm} = \frac{\sqrt{2}E_{d0}}{(km)^2 - 1} \sqrt{\cos^2 \alpha + (km \sin \alpha)^2}$$

Чем больше α гармоника возрастает. Максимальная величина гармоники при $\alpha = \frac{\pi}{2}$, Это понятно из графика и из формулы

$$(E_{dkm})_{\max} = \frac{km}{(km)^2 - 1} \sqrt{2}E_{d0}$$

С ростом m гармоники убывают.

Можно считать, что гармоники обратно пропорционально частоте.

$$E_{\sim} = \frac{m}{(m)^2 - 1} \sqrt{2} E_{d0}$$

$$f = m f_c$$

С коэффициентом запаса 10-20%. Если α не доходит до 90° , тогда считают для максимального α .

Ток возбуждения I_{min} , нулём никогда не бывает. По заданному току

$$I_{\sim} = \frac{E_{\sim}}{\omega L_{\Sigma}} =$$

L_{Σ} по всей цепи и постоянного и переменного тока

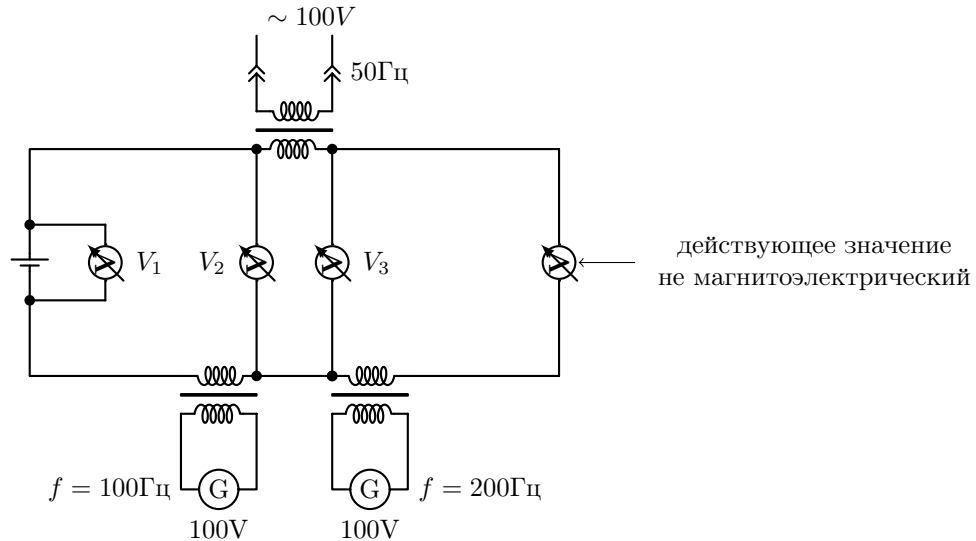
$$= \frac{\mu \sqrt{2} E_{d0}}{(m^2 - 1) 2\pi \mu F_c L_{\Sigma}} (m \text{ можно сократить})$$

$$L_{\Sigma} = L_{\phi} + L_n + L_{\Phi}$$

Возникает задача. Если нужно ограничить до заданной величины.

Рассмотрим другой способ решения, нравится больше, но тоже приближенный.

Рассмотрим небольшую задачу:



Если частоты не одинаковы, то действующее значение равно квадратному корню из суммы квадратов.

Оценим

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha$$

Не учтен угол коммутации в формуле. При больших α угол γ уменьшается.

γ вызван индуктивностью, для высших гармоник это сопротивление –

гармоники будут уменьшаться. Должен учитывать худший случай. Поэтому сейчас угол коммутации игнорируем. Найдём среднеквадратичную составляющую:

$$\sqrt{2}E_{2\phi} = \frac{E_{d0}}{\frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}}$$

из формулы (1)

$$E_{d\text{средне квадратичное}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi/m} \int \frac{\text{от квадрата}}{\text{мгновенного значения}} dt} =$$

$E_{d\text{средне квадратичное}}$ — это на активную нагрузку (физический смысл)

$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi/m} \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} \frac{E_{d0}}{\frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}} \cos \omega t dt} = \frac{E_{d0}}{\sqrt{2} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}} \sqrt{1 + \frac{m}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\alpha}$$

$$E_{d\nu} = \sqrt{E_{d\text{ср.кв.}}^2 - E_d^2} =$$

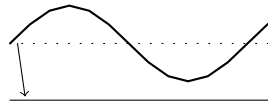
$E_{d\nu}$ — действующее значение всех гармоник на стороне постоянного тока. $E_d - E_{d\text{среднее}}$

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

Вместо $E_{2\phi}$ можно подставить $\frac{E_{d0}}{\sqrt{2} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}}$, можно преобразовать, в разной форме можно записать, но эта форма понятнее.

Напряжение может интересоваться только при чисто активной нагрузке.

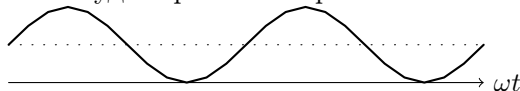
Наибольшие пульсации имеет граничный режим, который можно понимать



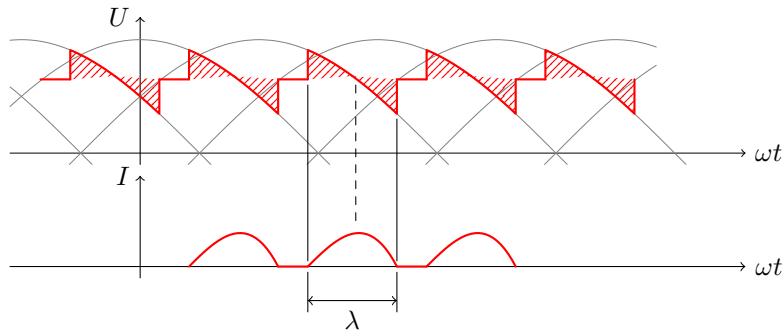
как случай когда постоянная составляющая равна пульсациям

Переменная составляющая не влияет на постоянную. Зависит от α , но зависит ещё от ЭДС нагрузки. если среднее будет уменьшаться то это никак не отразится на переменной составляющей.

Прерывистый режим начнётся, когда переменная составляющая коснётся 0. Это и будет граничный режим.



6-ти пульсная кривая.



Знаю, что ток маленький R_ϕ , R_D , R_Φ . $I_{\text{малое}} R_\Sigma$, много меньше ЭДС синусоиды

ЭДС нагрузки + ~~синусоида~~
 \uparrow
 пренебрежимо

Есть ЭДС нагрузки плюс индуктивность.

$$e_d - E_n = L_\Sigma \frac{\partial i_d}{\partial t} + \cancel{i_d R_\Sigma}$$

Член $i_d R_\Sigma$ демонстративно зачеркнут, потому что второго порядка малости. Даже при номинальном токе составляет несколько процентов. i_d это и есть $i_{\text{фазы}}$.

Проинтегрировав эту разность $i_d = f(\omega t)$, а потом возьмём интеграл

$$I_{d\text{среднее}} = \int i_d d(\omega t) =$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{m} - \text{границный режим.}$$

$$\frac{1}{2\pi/m} \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} i_d d(\omega t)$$

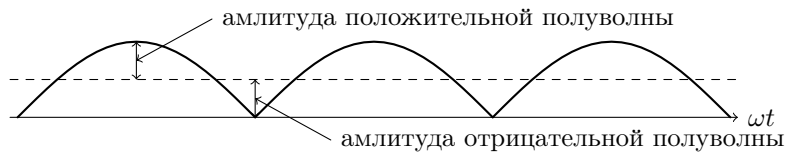
– среднее значение граничного тока.

$$I_{d\text{гр}} = f(m, \alpha) = I(\sim)$$

– амплитуда пульсаций выпрямленного тока.

Полагая, что $I_{\text{среднее}} = I_{\text{амплитуда пульсаций выпрямленного тока}}$, получим зависимость максимальных пульсаций с учётом гармонического состава. Этот способ учитывает реальную кривую без разложения её в ряд Фурье.

Чему равна амплитуда тока?



Можно ли считать полную амплитуду удвоением амплитуды нижней полуволны. Точного расчёта пульсаций тока не существует.

Размах колебаний ($A_+ + A_-$).

Зачем ограничивать пульсации тока. Каким образом выбирать ограничения. Ограничивают, потому что потери на R чем меньше тем лучше. Но ноль не может быть. Граница прерывистого режима плохо. Чем меньше граница тем лучше.

Хороший критерий был – электропривод постоянного тока. Но коллектор – слабое место. Коллектор–пластины–искрение, меняется магнитный поток. Нужно постараться, чтобы тока в этот момент не было. ЭДС движения... Сумма ЭДС должна быть равна 0. $I_{\text{якоря}}$ максимум – ограничивают.

$n_{\text{оборотов}} - \frac{\partial i}{\partial t}$ тем больше искрение. Переменная составляющая тока. Добавил пульсации – возникло искрение $L \frac{\partial i}{\partial t}$ – от переменной составляющей. А от частоты зависит переменная составляющая? Принято считать, что не зависит, 2% от номинального для крупных машин. Станина – литая сталь, поковка, литьё. Наборные пластины – дорого. Если поток добавочных полюсов должен компенсировать $I_{\text{якоря}}$ Якорь шихтованный – нет намагничивающих токов и поток не запаздывает, а в станине эти эффекты ограничивают 2% Станина тоже из стали: из шихтованной стали 20% пульсации

$\Delta I = I_{\text{ном}}^2 R$ несколько процентов 3-2%. КПД 96.5 - 3,4% – потери стали, меди, механические.

Добавилась пульсация 5%

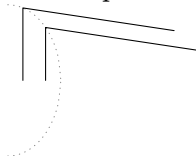
$$I = \sqrt{I_{\text{пост}}^2 + I_{\text{перем}}^2} R$$

Выражение граничного тока:

$$I_{d\text{гран}} = \frac{E_{d0}}{\omega L} \left[1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right] \sin \alpha$$

где, ω – питающей сети. $\omega_{\text{сети}} = 2\pi f_{\text{сети}}$ Максимум при $\alpha = 90^\circ$, очевидно, зависит от числа фаз.

Это выражение даст эллипс



0.0.4 Энергетические характеристики тиристорных преобразователей

КПД $\eta = f(U_d)$, при $I_d = const$. Зависимость от напряжения и тока, α – управления.

Электрические машины:

- постоянного тока (генераторы, моторы)
- синхронные
- асинхронные
- трансформаторы

Напряжение сети = $const$, от $\cos \phi$

В электрических машинах $\eta = f(\frac{I}{I_{ном}})$ или $f(\frac{S}{S_{ном}})$ или $f(\frac{P}{P_{ном}})$,
 $\cos \phi$

У синхронных генераторов зависимость от ϕ нагрузки.

Когда я меняю напряжение интересует что будет с $\cos \phi$

КМ(λ) – коэффициент мощности, есть отношение активной мощности к полной.

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{входа}}}$$

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

где, P – активная мощность, S – полная мощность.

Коэффициент мощности = $\cos \phi$ – неверно в общем случае. Так можно говорить, если напряжение симметрично, синусоидально, и одной частоты. В нашем случае разные частоты.

Допущение: сеть симметрична и синусоидальна.

$$\lambda = \frac{S_{(1)}}{S} \cdot \frac{P}{S_{(1)}}$$

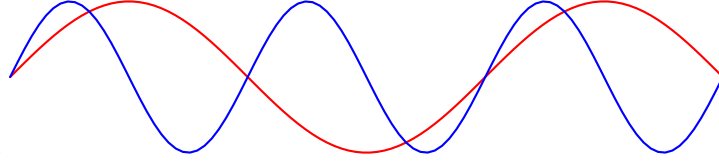
S – полная мощность $U \cdot I$ формальное произведение.

$S_{(1)} = U_{(1)} \cdot I_{(1)}$ – если однофазная система.

$$S = \underbrace{U_{\text{средне квадратичное}}}_{\text{по допущению } U_1} \cdot I_{\text{средне квадратичное}}$$

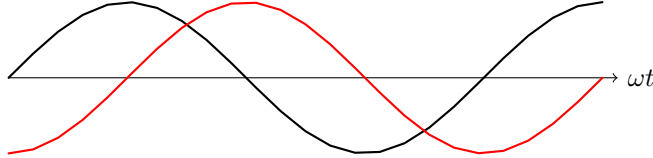
А ток – это наш ток и мы знаем, что он несинусоидальный. Если включу на активное сопротивление последовательно 100V и 100V, получу 200V. А если включить на активно-индуктивную нагрузку. У нас было 50Гц, А в токе разные частоты. Другие частоты в токе несут ли активную

и реактивную мощность? Несут токи одинаковой частоты $U(\omega) \cdot I(\omega) -$



одинаковой частоты.

Есть колебательная мощность. Это реактивная? нет



Знаки разные(в этом смысле похоже на предыдущий случай), но не совсем. <могу поставить <C> и скомпенсировать>

$$\begin{aligned} P \text{ [Вт]} &= UI_{\text{актив}} \\ Q \text{ [вар]} &= UI_{\text{реактив}} \\ S \text{ [ВА]} &= S = \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned}$$

Эти соотношения для одинаковых частот.

Если частоты разные, то это мощность искажения

$$\lambda = \frac{S_1}{S} \frac{P}{S_1} = \nu \cos \phi$$

, где $S_1 = U_1 \cdot I_1$

Нелинейные нагрузки искажают форму тока, портят стандарты, требуют принятия мер для качества напряжения. Несинусоидальность не больше столько-то %.

Пренебрегаем влиянием внешних.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \\ \lambda &= \frac{S_1}{S} \frac{P}{S_1} = \nu \cos \phi \end{aligned}$$

Наша специальность самая энергетическая.

$$\text{вых} = U_d I_d$$

$$\text{вх} = \text{вых} + \Delta P_{\Sigma}$$

, где P_{Σ} – потери, то что преобразовалось в тепло, электромагнитную волну, звук, свет.

Представим, что мы регулируем напряжение.

$$\eta = \text{КПД} = \frac{U_d I_d}{U_d I_d + \Delta P_{\Sigma}}$$

ΔP_Σ на активных элементах: $I_d^2 r_{\Sigma \text{ эквив}} + \dots + I_d k_0 U_0 + \Delta P_{xx}$, где $k_0 U_0$ может быть несколько вентилях. Ток в вентилях меняется пропорционально I_d , I_ϕ – в обмотке трансформатора. $I_\phi \div I_d$ (ток в обмотке трансформатора пропорционален I_d , в два раза увеличилось I_ϕ , значит в два раза увеличилось I_d , т.е. есть составляющая пропорциональная I_d)

А если выключено, потери не зависят от I_d (система управления, лампочки)

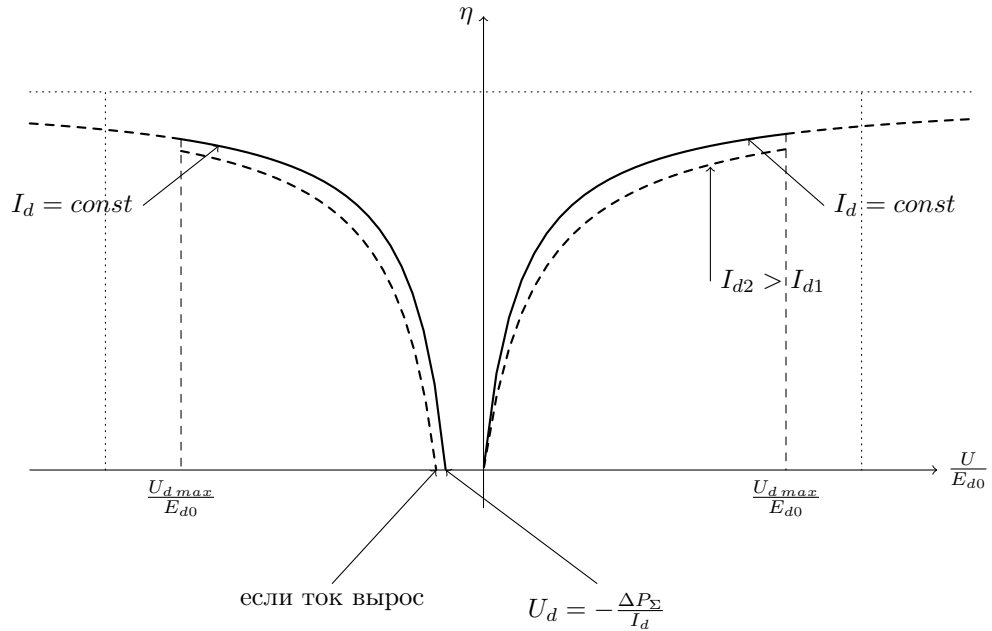
$$= aI_d^2 + bI_d^1 + cI_d^0$$

$$\eta = (\text{добавил и вычел } \pm \Delta P_\Sigma) = 1 - \frac{\Delta P_\Sigma}{U_d I_d + \Delta P_\Sigma} =$$

Выражение(??) меньше единицы когда и U_d и I_d одного знака. $I_d > 0$ всегда больше нуля. значит $0 < U_d < 0$ (может быть и больше и меньше нуля)

$$= 1 - \frac{\frac{\Delta P_\Sigma}{U_d I_d}}{1 + \frac{\Delta P_\Sigma}{U_d I_d}}$$

Сейчас будем рассматривать $I_d = \text{const}$ при бесконечном увеличении U_d $\eta \rightarrow 1$ Но U_d не больше чем $U_{d \max}$



$P_{\text{вых}}$. При отрицательном η поменялись местами выход и вход. То, что было $\eta_{\text{выпрямителя}}$ при $(U_d > 0)$ стало при $U_d < 0$

$$\eta_{\text{инвертора}} = \frac{U_d I_d + \Delta P_{\Sigma}}{U_d I_d} = 1 + \underbrace{\frac{\Delta P_{\Sigma}}{U_d I_d}}_{\substack{\text{отрицательно} \\ \text{эта дробь} \\ \text{станет равна -1}}}$$

при $u_d = -\frac{\Delta P_{\Sigma}}{I_d}$ – КПД упадёт до 0 и обратно пропорционально току.

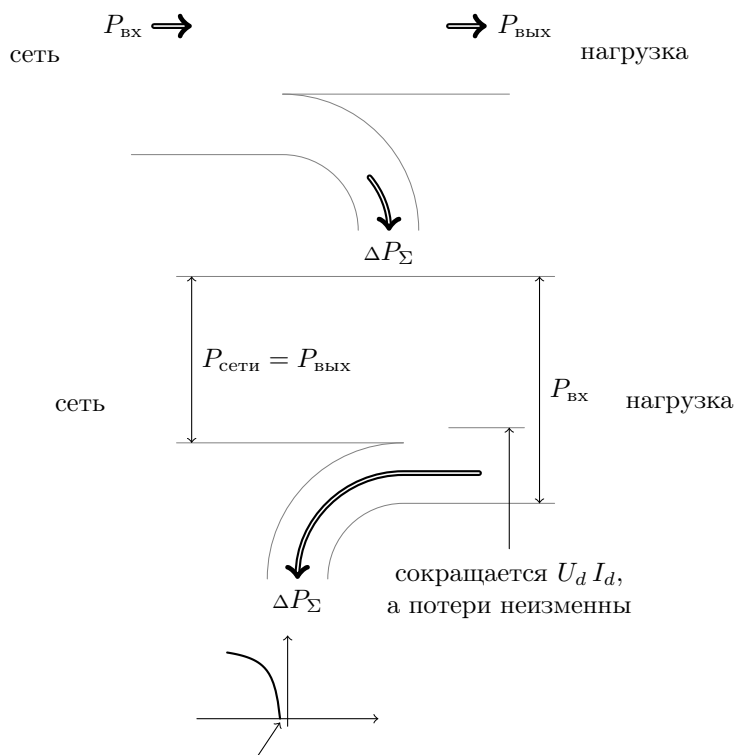
$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{a I_d^2}{I_d}$$

$\eta_{\text{граничное}} = 0!$ при $U_d > 0$

$\eta_{\text{граничное}}$ при $U_d < U_{d_{\text{граничное}}} = -\frac{\Delta P_{\Sigma}}{I_d}$

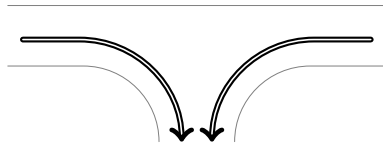
Осталось понять чему равен η при $U_{d_{\text{граничное}}} < U_d < 0$:
 η по определению равен нулю потому что $P_{\text{вых}} = 0$.

0.0.5 Энергетические реки:



Нагрузка едва покрывает потери

Нагрузка отдаёт, а до сети ничего не доходит.



ΔP_{Σ} потери

Нагрузка не выпрямительный режим, но и не инверторный. Получают только потери.

А если I_d изменится: I_d вырос в два раза, числитель вырастет в два раза, но и ΔP_{Σ} тоже вырастет. Всё зависит от коэффициента(-тов).

Реально, КПД упадет.

слева, при большом токе вырастет γ

0.0.6 Коэффициент мощности

ν – коэффициент искажения $\cos \phi$ – коэффициент угла сдвига тока, численно равен коэф мощности, когда напряжение и ток синусоидальны.

$$\cos \phi = \frac{P}{S}$$

S всегда положительна, P бывает и положительна и отрицательна. $Q > 0$ – индуктивность, так принято. Преобладают нагрузки, которые потребляют положительную реактивную мощность. В воздушной линии $C \sim \frac{S}{d}$ В кабельных линиях – емкости.

C генерирует в сеть реактивную мощность.

ϕ положительный, когда ток отстает от напряжения.

$\sin \phi < 0 \Rightarrow Q < 0$

\cos может быть и положительным и отрицательным.

$$\frac{P}{S} = |I| \cdot |U| \cdot \cos \phi$$

$\cos \phi = -0.5$ Инвертор работает с углом $\sim 60^\circ$.

Реактивная мощность не передаёт балластную мощность. Из-за реактивных токов приходится увеличивать мощность <приборов, трансформаторов>

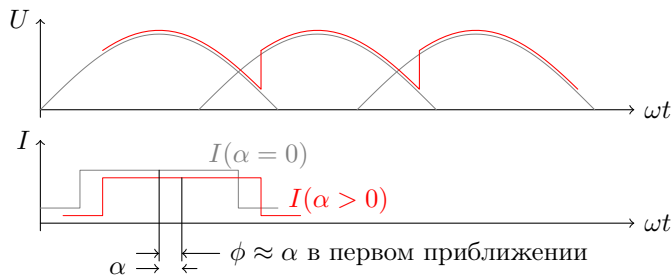
Ток, который создаёт магнитное поле

$$L = \frac{\Phi}{i}$$

У синхронных машин магнитное поле создаётся обмоткой возбуждения.

У асинхронных двигателей создаётся реактивным током.

α сдвинул на 90° – я принудительно сдвинул начало генерации тока.



$\alpha = 0$ – фаза тока совпадает с фазой напряжения. $\phi = \alpha$ в первом приближении.

Насколько сдвинулись гармоники тока? Но это никак не связано с энергией!

$I_d = \text{const}$ будем рассматривать для всех энергетических характеристик.

$$P = U_d I_d \quad (\neq \Delta P_S)$$

равенство буду считать хотя бы примерно (пока не буду считать потери)

Поддерживая $I_d = \text{const}$ S будет оставаться неизменной. $S_1 \cong \text{const}$, потому что $I_d \cong \text{const}$

$$\begin{aligned} \cos \phi = \frac{P}{S_{(1)}} &\approx U_d \approx \cos \alpha \\ &\parallel \\ \text{const} &\parallel U_d = E_{d0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} \end{aligned}$$

При $\alpha = 0$ $\gamma = 0$ $U_d = E_{d0}$

Чисто активная мощность, значит ...

При $\alpha = 0$ $\gamma = 0$ $U_d = E_{d0}$, $P = S_1$

$$P \Big|_{\alpha=0} = S_1 = E_{d0} I_d$$

$\gamma=0$

при P , которое я регулирую

$$\frac{P}{S} = \frac{E_d I_d \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}}{E_d I_d}$$

отсюда

$$\cos \phi = \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}$$

достаточно точно, угол ϕ пропорционален α .