

Лекция 5

Краткое содержание

Глава 4. Трехфазные цепи синусоидального тока

4.14. Вращающееся магнитное поле

4.15. Принцип действия асинхронного двигателя

4.16. Несинусоидальные режимы в трехфазных цепях

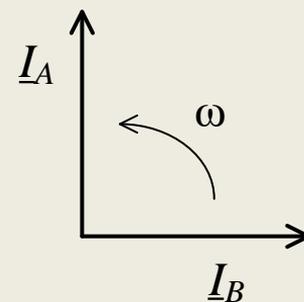
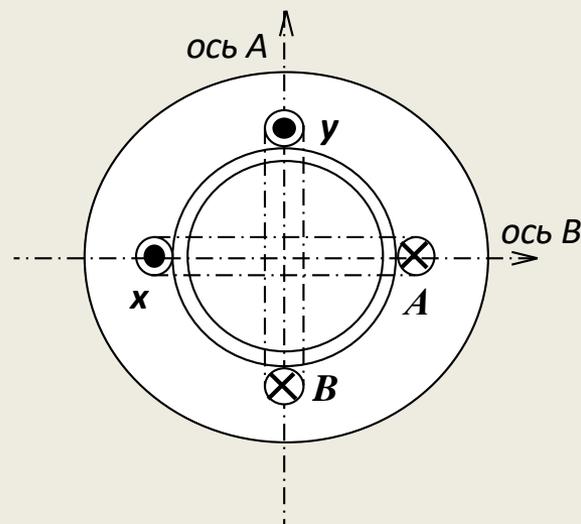
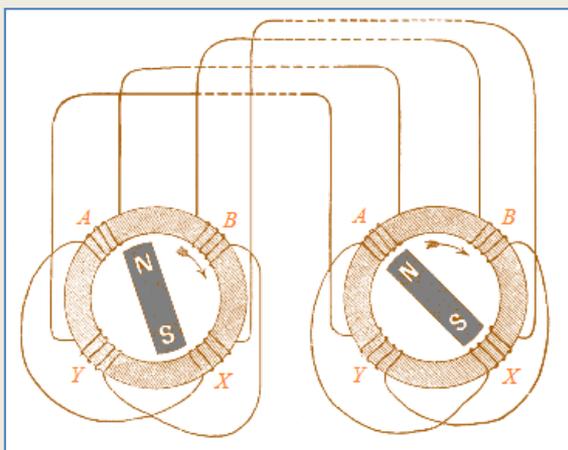
4.17. Расчет трехфазных цепей с источниками ЭДС, содержащими высшие гармоники

4.14. Вращающееся магнитное поле

В основе принципа действия наиболее распространенных электрических машин переменного тока лежит возможность получения **вращающихся магнитных полей**. Вращающимся магнитным полем называется магнитное поле, ось которого вращается в пространстве с постоянной угловой частотой. Если при этом величина индукции в любой точке оси магнитного поля остается постоянной, то такое поле называется круговым вращающимся магнитным полем. Это связано с тем, что его можно изобразить вращающимся в пространстве вектором неизменной длины, конец которого при вращении описывает окружность. Вращающееся магнитное поле образуется системой обмоток, сдвинутых в пространстве относительно друг друга. Нужно иметь как минимум две пространственно смещенные обмотки с несовпадающими по фазе токами для создания вращающегося магнитного поля. Формирование кругового вращающегося магнитного поля является необходимым условием работы асинхронных и синхронных машин. Вращающееся магнитное поле было получено в 1884 году физиком **Феррарисом**. Но он ошибочно полагал, что данное явление не имеет практического применения. Большой вклад в развитие многофазных электрических систем внес талантливый инженер **Никола Тесла**, также открывший в 1888 году явление вращающегося магнитного поля и тогда же получивший патенты на создание двухфазных генераторов, двигателей, трансформаторов.

Двухфазные системы

Двухфазная система имеет две обмотки, расположенные перпендикулярно относительно друг друга. Вращающееся магнитное поле получается при использовании двух переменных токов, сдвинутых относительно друг друга на четверть периода. Конструкции двухфазных машин, одним из изобретателей которых был Никола Теста, имели существенные недостатки: выступающие полюса, сосредоточенные обмотки на полюсах и роторе, необходимость использования четырех проводов. В современной электротехнике практическое использование двухфазных систем очень ограничено (автоматическое регулирование мостовых и компенсационных схем, кулеры персональных компьютеров и т. д.)

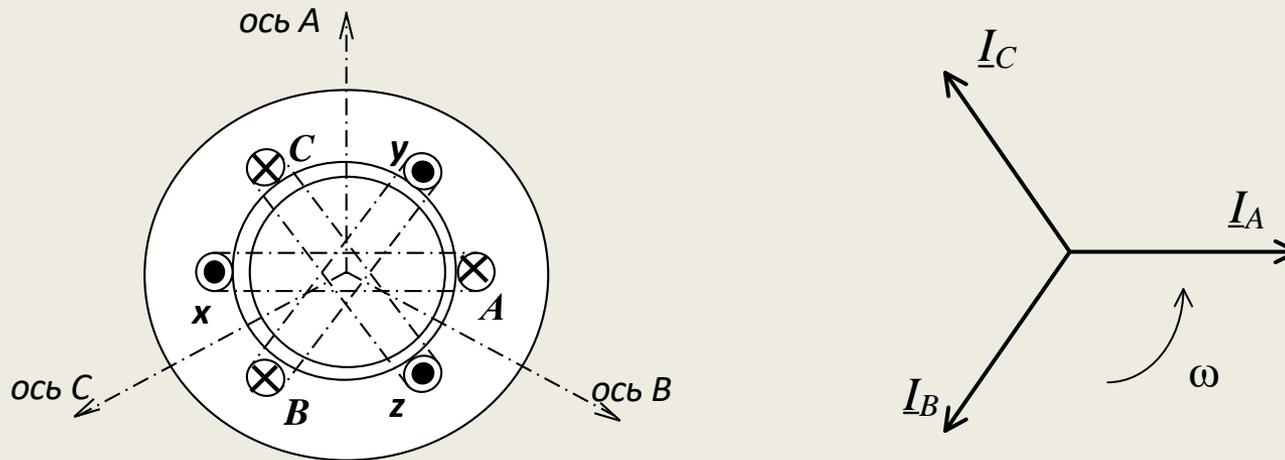


Трехфазные системы

Более совершенной, оптимальной по многим параметрам является трехфазная система, разработанная и предложенная к практическому применению русским инженером *Михаил Осиповичем Доливо-Добровольским*. В трехфазной электрической машине три обмотки расположены под углом 120° относительно друг друга. Одна фаза обмотки состоит из проводников, распределенных равномерно на $1/3$ внутренней поверхности статора (внешнего массивного неподвижного полого цилиндра из ферромагнитного материала). Две другие фазы обмотки занимают такие же участки внутренней поверхности статора, так что в целом трехфазная обмотка представляет собой систему проводников, равномерно распределенных вдоль воздушного зазора. Внутри статора соосно с ним расположена подвижная часть электрической машины - ротор. Между статором и ротором находится воздушный зазор.

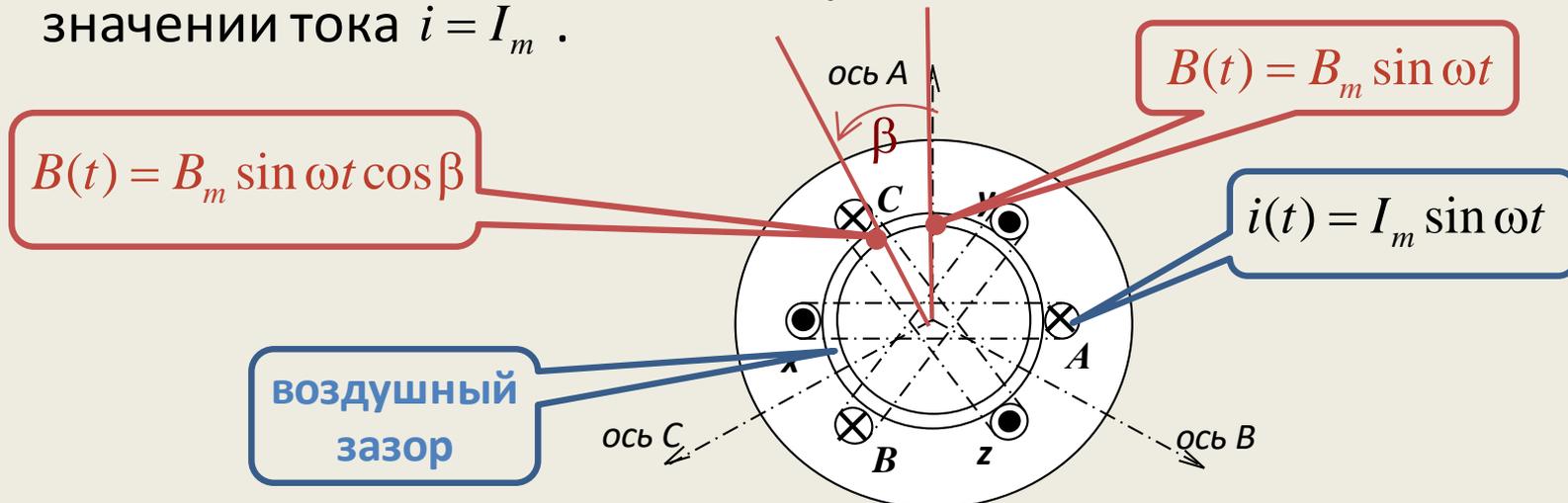
Трёхфазные системы

Если для наглядности представить обмотки статора состоящими из одного витка, то на статоре будет только шесть пазов, в каждом из которых будет лежать половина витка обмотки. Обозначим начала витков обмоток буквами A , B и C , а концы витков буквами X , Y и Z . Обозначим также направления тока в витках обмоток, считая положительным направление от начала к концу обмотки. Тогда для положительных значений тока стороны A , B и C будут обозначены крестом, а стороны Y и Z – точкой.



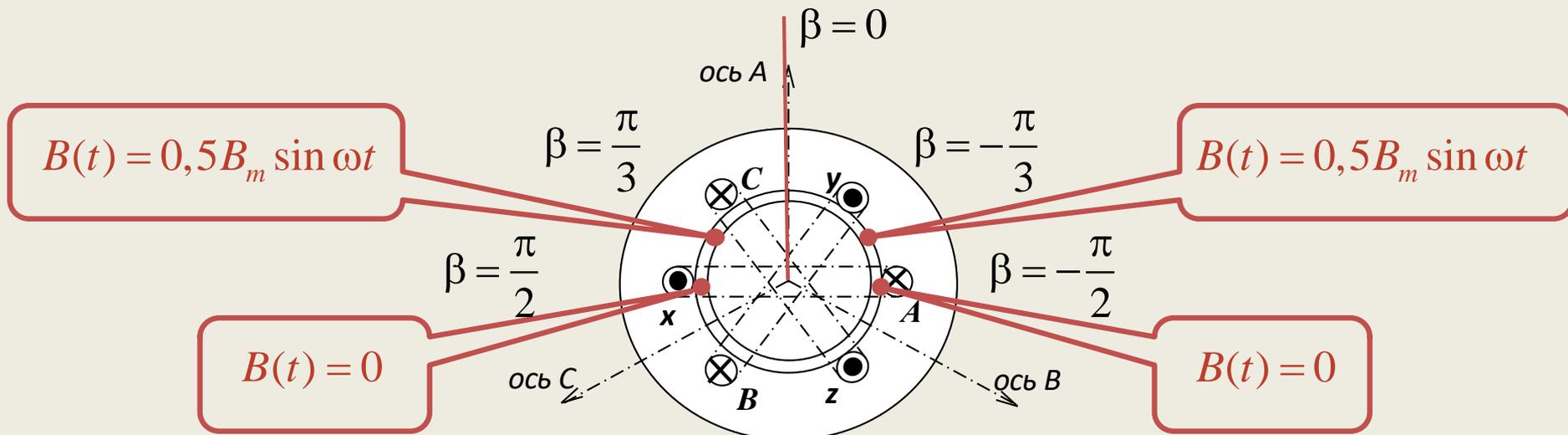
Вращающееся магнитное поле

Рассмотрим *магнитное поле одной фазы* обмотки электрической машины. Для обмотки А-Х ось магнитного потока - ось А (направление по правилу правого винта), плоскость, перпендикулярную оси магнитного потока называют *нейтралью*. Нейтраль делит статор и ротор на две части - полюса N и S. При синусоидальном токе в обмотке статора в любой момент времени распределение магнитной индукции в воздушном зазоре синусоидальное. В каждой точке воздушного зазора индукция изменяется по тому же закону, что и ток. Если β - угол по окружности статора, отсчитанный от оси А, то магнитная индукция меняется по закону $B(t) = B_m \sin \omega t \cos \beta$, где B_m - магнитная индукция на оси А ($\beta = 0$) при максимальном значении тока $i = I_m$.

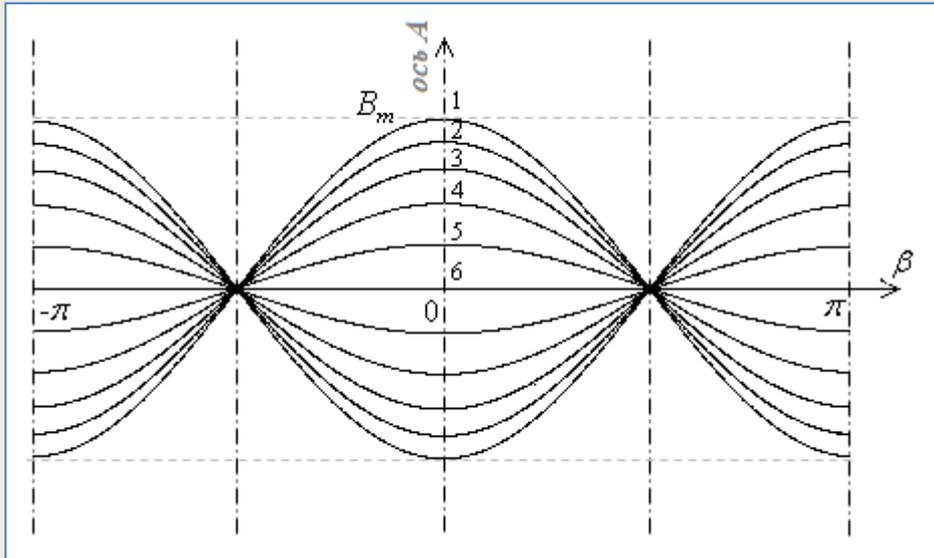


Вращающееся магнитное поле

В точках, расположенных от оси A по окружности $\beta = \pm \frac{\pi}{3}$ наибольшая величина магнитной индукции равна $B_m \cos(\pm \frac{\pi}{3}) = 0,5B_m$. В плоскости нейтрали $\beta = \pm \frac{\pi}{2}$ магнитная индукция равна нулю при любом значении тока. Магнитное поле одной обмотки с синусоидальным током - **пульсирующее**. В двух других катушках, расположенных по трети окружности статора, оси которых расположены в пространстве под углом 120° относительно друг друга с токами двух других фаз, также формируется пульсирующее магнитное поле.



Пульсирующее магнитное поле одной обмотки



На рисунке показано пульсирующее магнитное поле обмотки: β - угол по окружности статора, отсчитанный от оси A;
 (1...6) – шесть различных моментов времени: $\omega t_1 = \pi/2 = 90^\circ$ ($t_1 = T/4$)
 ... $\omega t_6 = 180^\circ$ ($t_6 = T/2$).

Используя тригонометрическую формулу можно разложить индукцию на две составляющие:

$$B(t) = B_m \sin \omega t \cos \beta = \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin(\omega t - \beta)}_{B' \text{ (прямая)}} + \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin(\omega t + \beta)}_{B'' \text{ (обратная)}} = B' + B''$$

Таким образом, пульсирующее поле математически раскладывается на два синусоидальных магнитных поля с одинаковой амплитудой, одно из которых вращается в порядке следования фаз A, B, C, а другое – в противоположную сторону (прямые и обратные составляющие).

Вращающееся магнитное поле трех обмоток

Токи в обмотках *прямой последовательности* чередования фаз:

$$i_A(t) = I_m \sin \omega t \quad i_B(t) = I_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad i_C(t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Тогда пульсирующее магнитное поле каждой обмотки:

$$B_A(t) = B_m \sin \omega t \cos \beta = \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin(\omega t - \beta)}_{B'_A} + \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin(\omega t + \beta)}_{B''_A} = B'_A + B''_A$$

$$B_B(t) = B_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) = \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin(\omega t - \beta)}_{B'_B} + \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin\left(\omega t + \beta - \frac{4\pi}{3}\right)}_{B''_B} = B'_B + B''_B$$

$$B_C(t) = B_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) = \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin(\omega t - \beta)}_{B'_C} + \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin\left(\omega t + \beta + \frac{4\pi}{3}\right)}_{B''_C} = B'_C + B''_C$$

Поля всех трех катушек складываются:

$$B' = B'_A + B'_B + B'_C = \frac{3B_m}{2} \sin(\omega t - \beta)$$

прямые составляющие

$$B'' = B''_A + B''_B + B''_C = 0$$

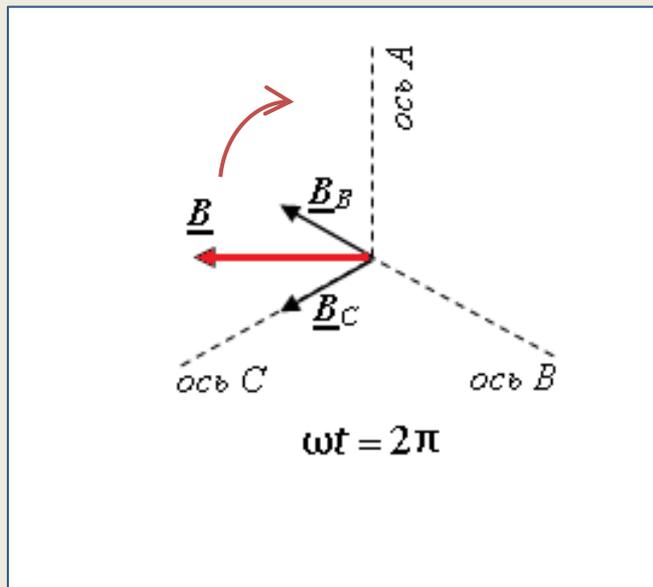
обратные составляющие

Вращающееся магнитное поле трех обмоток

Результирующая магнитная индукция:

$$B(t) = B_A(t) + B_B(t) + B_C(t) = \frac{3B_m}{2} \sin(\omega t - \beta)$$

Максимум индукции $1,5B_m$ перемещается по окружности по направлению от начала первой катушки A к началу второй катушки B , т.е. в сторону катушки с отстающим по фазе током. В течении одного периода магнитное поле катушек совершает полный оборот от A к B и далее к C , т.е. по часовой стрелке.



Направление вращения зависит исключительно от последовательности чередования фаз токов в катушке. Если поменять местами токи в фазах B и C , сохранив подключение в фазе A , то направление вращения магнитного поля изменится на противоположное.

4.15. Принцип действия асинхронного двигателя

У асинхронной машины угловая скорость вращения ротора меньше скорости вращения магнитного поля статора и зависит от нагрузки. Асинхронная машина также обладает свойством обратимости, т.е. может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Асинхронный двигатель (АД) имеет две основные части - неподвижный статор и вращающийся ротор. С внутренней стороны статора сделаны пазы, куда уложены обмотки статора. В пазах ротора размещается обмотка ротора. Воздушный зазор между статором и ротором делается возможно малым. В зависимости от конструкции ротора АД бывают с **короткозамкнутым** и **фазным роторами**. Наиболее распространен двигатель с короткозамкнутым ротором, так как он имеет простую конструкцию, простой пуск, допускает большие перегрузки. К недостаткам относят большой пусковой ток, чувствительность к колебаниям напряжения и т.д.

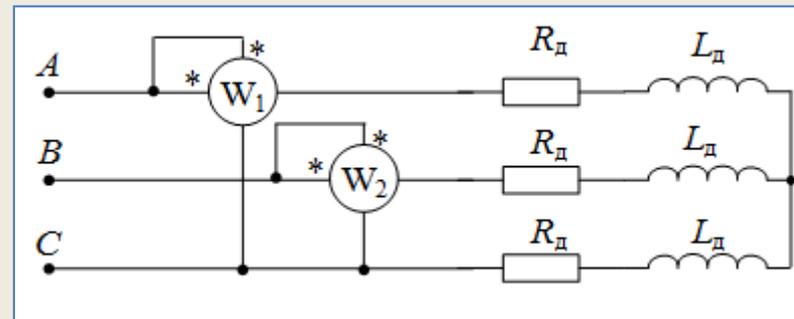
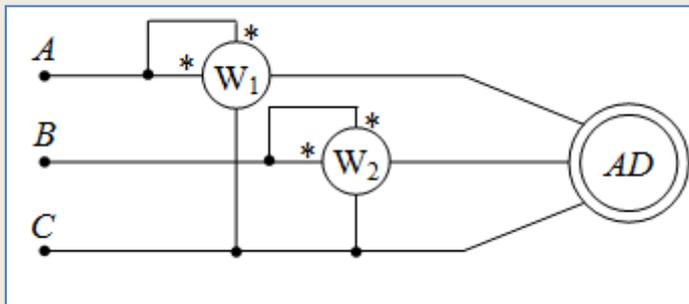
Принцип действия асинхронного двигателя

При решении задач используют схемы замещения асинхронного двигателя для *прямой*, *обратной* и *нулевой* последовательности или составляют системные схемы замещения АД. Нормальным режимом работы двигателя считается режим *прямой последовательности*, когда магнитное поле и ротор вращаются в одну и ту же сторону с номинальным скольжением. Если подвести к обмоткам статора двигателя систему *обратной последовательности*, то вращающееся магнитное поле относительно ротора будет иметь угловую скорость, почти в два раза превышающую скорость движения поля относительно статора и во много раз превышающую скорость поля относительно ротора при нормальном режиме работы. В результате резко возрастут токи, индуцированные в роторе, которые в большей степени будут ослаблять наводящее их магнитное поле. В свою очередь, уменьшение ЭДС, наводимых магнитным полем в обмотках статора, вызовет увеличение токов в статоре и, следовательно, *полное сопротивление двигателя для токов обратной последовательности будет меньше его сопротивления для токов прямой последовательности*.

Принцип действия асинхронного двигателя

Токи *нулевой последовательности* не создают вращающегося магнитного поля, потоки, создаваемые токами нулевой последовательности, одновременно во всех трех фазах направлены к ротору и замыкаются от ротора к статору по воздуху в торцевых частях двигателя. *Сопротивление нулевой последовательности двигателя существенно отличается от сопротивления прямой и обратной последовательности.*

При расчетах трехфазных цепей двигатель представляется динамической трехфазной нагрузкой с соединением фазных обмоток "звезда", активно-индуктивного или индуктивного характера.



4.16. Несинусоидальные режимы в трехфазных цепях

В трехфазных цепях фазные ЭДС могут содержать *высшие гармоники*. Так как большая часть трехфазных источников представляют собой синхронные генераторы (или вторичные обмотки трансформаторов), то в силу симметричности кривых намагничивания магнитопроводов напряжения на выходе *не содержат четных гармоник*. С учетом пространственного сдвига обмоток при вращении магнитного поля с частотой ω временное запаздывание фазных ЭДС составляет $t - T/3$ или $t - 2T/3$.

Замечание: в трехфазных цепях, где источниками являются электронные устройства (инверторы, преобразователи и т.д.) в напряжении источников могут содержаться и четные гармоники.

Высшие гармоники в трехфазных цепях

Пусть ЭДС фазы А меняется по закону

$$e_A = E_{1m} \sin \omega t + E_{3m} \sin 3\omega t + E_{5m} \sin 5\omega t + \dots + E_{km} \sin k\omega t$$

Мгновенные значения ЭДС в фазах В и С:

$$\begin{aligned} e_B &= E_{1m} \sin \omega \left(t - \frac{T}{3} \right) + E_{3m} \sin 3\omega \left(t - \frac{T}{3} \right) + E_{5m} \sin 5\omega \left(t - \frac{T}{3} \right) + \dots = \\ &= E_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + E_{3m} \sin (3\omega t - 2\pi) + E_{5m} \sin \left(5\omega t - \frac{10}{3}\pi \right) + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_C &= E_{1m} \sin \omega \left(t - \frac{2T}{3} \right) + E_{3m} \sin 3\omega \left(t - \frac{2T}{3} \right) + E_{5m} \sin 5\omega \left(t - \frac{2T}{3} \right) + \dots = \\ &= E_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + E_{3m} \sin (3\omega t - 4\pi) + E_{5m} \sin \left(5\omega t - \frac{20}{3}\pi \right) + \dots \end{aligned}$$

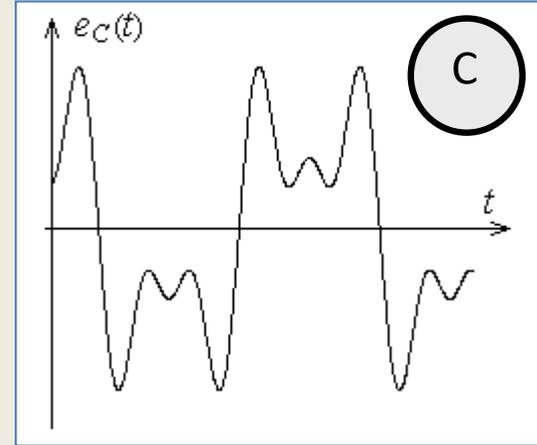
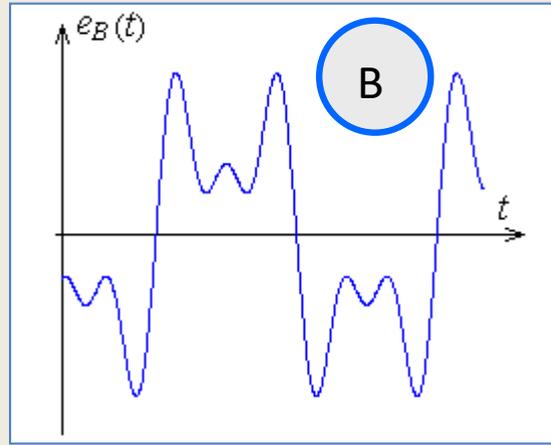
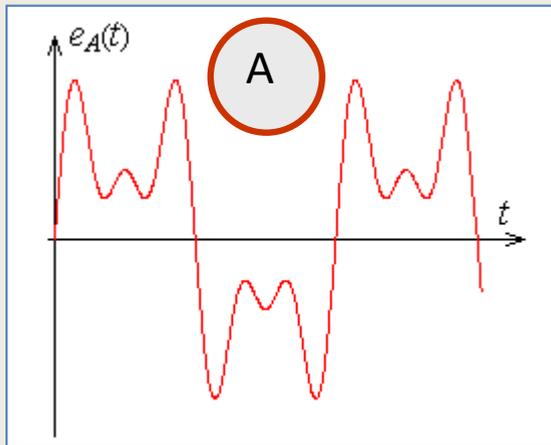
Высшие гармоники в трехфазных цепях

Пример 1. Пусть ЭДС фазы А меняется по закону

$e_A = 10\sin \omega t + 8\sin 3\omega t + 5\sin 5\omega t$. Определим фазные ЭДС для фазы В и С:

$$e_B = 10\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + 8\sin(3\omega t - 2\pi) + 5\sin\left(5\omega t - \frac{10}{3}\pi\right)$$

$$e_C = 10\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + 8\sin(3\omega t - 4\pi) + 5\sin\left(5\omega t - \frac{20}{3}\pi\right)$$



Высшие гармоники в трехфазных цепях

Из выражений для $e_A(t)$, $e_B(t)$, $e_C(t)$ следует, что:

- гармоники $k = 1, 7, 13, \dots$ образуют симметричную систему **прямой последовательности**,
- гармоники номер которых кратен трем $k = 3, 9, 15, \dots$ симметричную систему **нулевой последовательности**,
- гармоники $k = 5, 11, 17, \dots$ симметричную систему **обратной последовательности**

Аналогичные выводы можно сделать и в отношении фазных токов и напряжений.

Симметричная система	Номера гармоник
прямой последовательности	1, 4 , 7, 10 , 13, 16 , 19, 22 , ...
обратной последовательности	2 , 5, 8 , 11, 14 , 17, 20 , 23, ...
нулевой последовательности	0, 3 , 6 , 9, 12 , 15, 18 , 21, ...

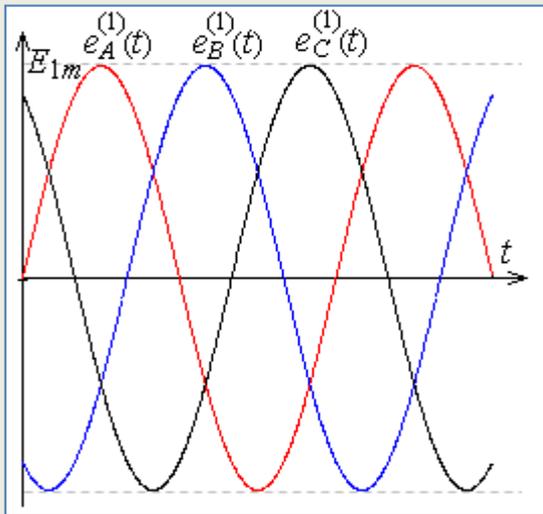
Высшие гармоники в трехфазных цепях

1 гармоника

$$e_A^{(1)}(t) = 10 \sin \omega t$$

$$e_B^{(1)}(t) = 10 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_C^{(1)}(t) = 10 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

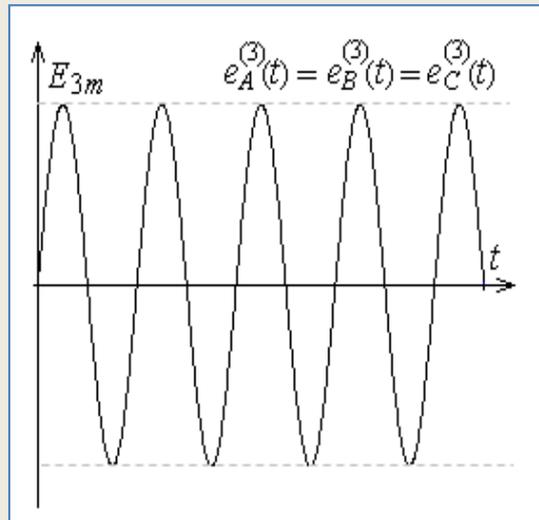


3 гармоника

$$e_A^{(3)}(t) = 8 \sin(3\omega t)$$

$$e_B^{(3)}(t) = 8 \sin(3\omega t)$$

$$e_C^{(3)}(t) = 8 \sin(3\omega t)$$

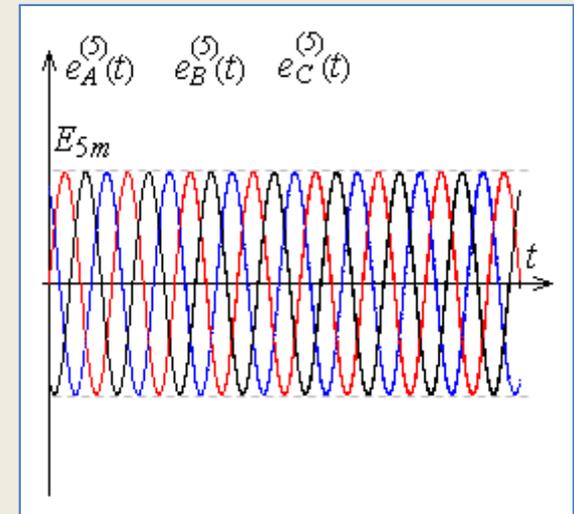


5 гармоника

$$e_A^{(5)}(t) = 5 \sin 5\omega t$$

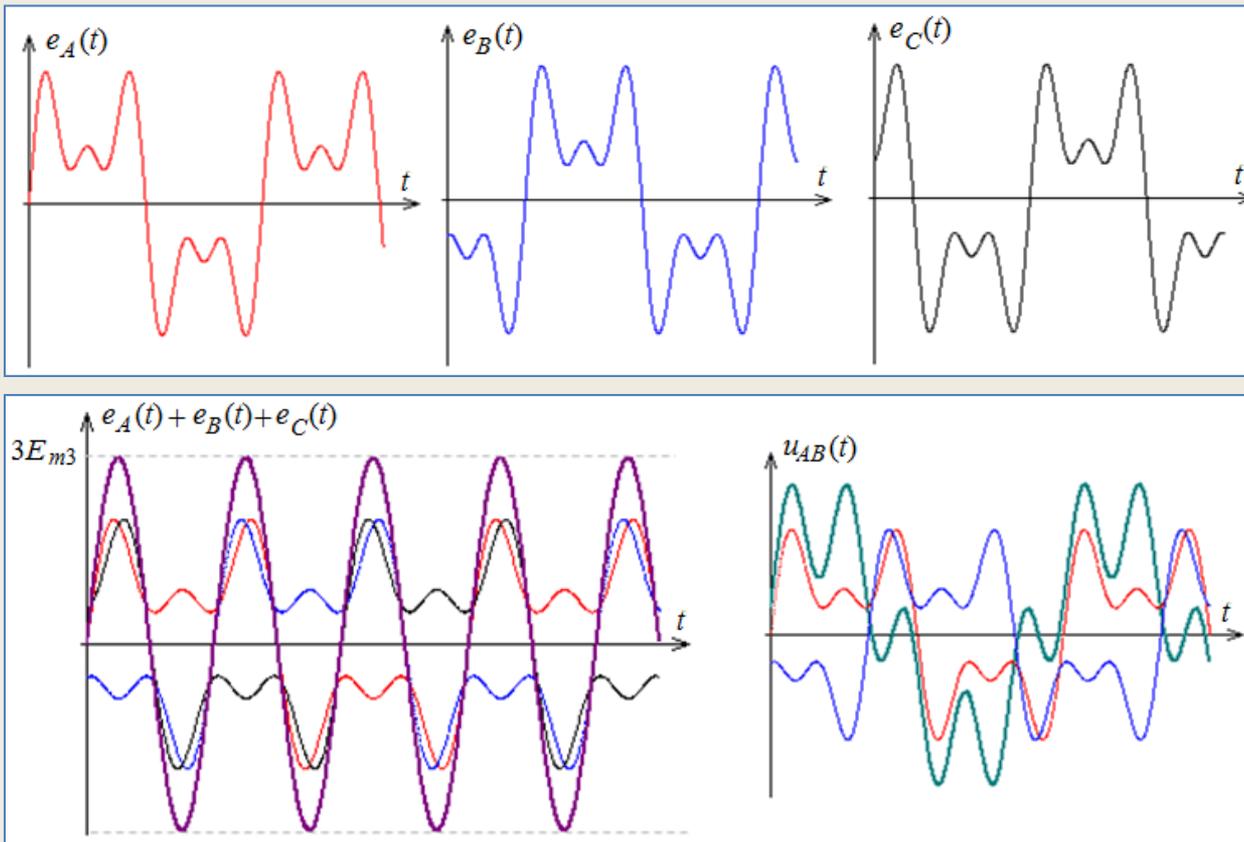
$$e_B^{(5)}(t) = 5 \sin\left(5\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_C^{(5)}(t) = 5 \sin\left(5\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$



Высшие гармоники в трехфазных цепях

Рассмотрим теперь, как влияет наличие высших гармоник на **сумму фазных ЭДС** и формирование **линейного напряжения**. На рисунках ниже приведены графики мгновенных значений фазных ЭДС, содержащих первую, третью и пятую гармоники и сумму фазных ЭДС, график мгновенного значения линейного напряжения при соединении фазных обмоток звездой.



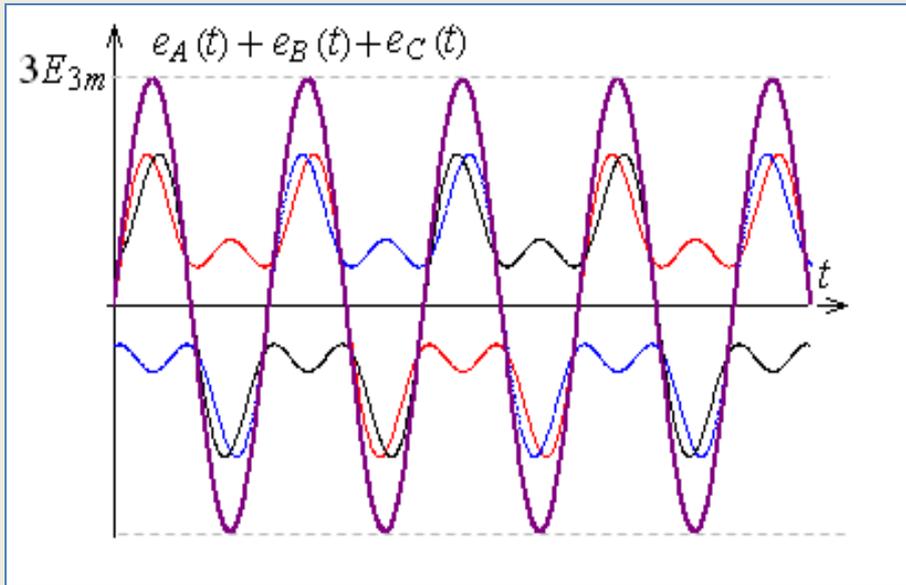
Состав ряда фазных и линейных напряжений отличается

Высшие гармоники в трехфазных цепях

Сумма фазных ЭДС $\sum e_{\phi}(t) = \sum_k e^{(k)}(t) \quad \sum_{k \neq 3n} e^{(k)}(t) = 0 \quad n=1,2,3,\dots$

$$e_A(t) + e_B(t) + e_C(t) = \sum_{k=3,9,\dots,3(2n-1),\dots} 3E_{km} \sin k\omega t$$

(сумма гармоник, кратных трем)



Аналогично для обмоток трансформатора сумма фазных напряжений:

$$u_A^{(k)} + u_B^{(k)} + u_C^{(k)} = 0$$

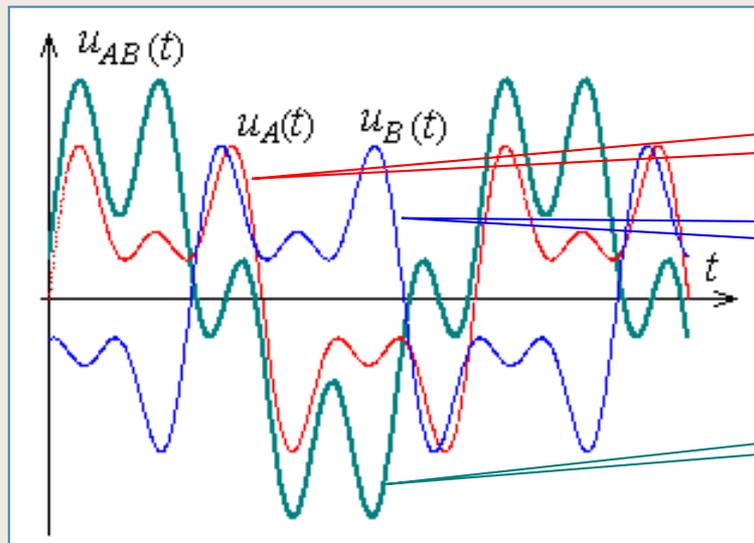
$$k = 1, 5, 7, 11, \dots$$

$$u_A^{(k)} + u_B^{(k)} + u_C^{(k)} = 3u_A^{(k)}$$

$$k = 3, 9, 15, \dots$$

Высшие гармоники в трехфазных цепях

Замечание: если вторичные обмотки трехфазного генератора или трансформатора соединены *звездой*, *линейные напряжения*, как равные разностям двух соответствующих фазных напряжений, *не содержат гармоник, кратных трем*, поскольку фазные напряжения нулевой последовательности равны.



$$u_{\text{л}}(t) = \sum_{k \neq 3n} u_{\text{л}}^{(k)}(t) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

фазное напряжение $u_A(t)$

фазное напряжение $u_B(t)$

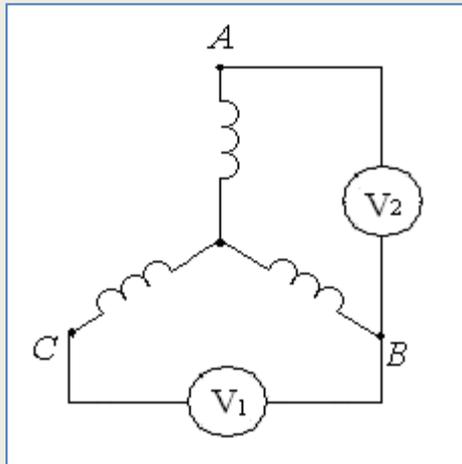
линейное напряжение $u_{AB}(t)$

Высшие гармоники в трехфазных цепях

Пример 2. Вторичные обмотки трехфазного трансформатора соединены звездой, фазное напряжение

$$u_{\phi} = U_{1m} \sin \omega t - U_{3m} \sin 3\omega t + U_{5m} \sin 5\omega t - U_{7m} \sin 7\omega t + U_{9m} \sin 9\omega t.$$

Найти показания вольтметров электромагнитной системы.



$$\frac{U_{\text{л}}}{U_{\phi}} < \sqrt{3}$$

Решение: действующее значение фазного напряжения

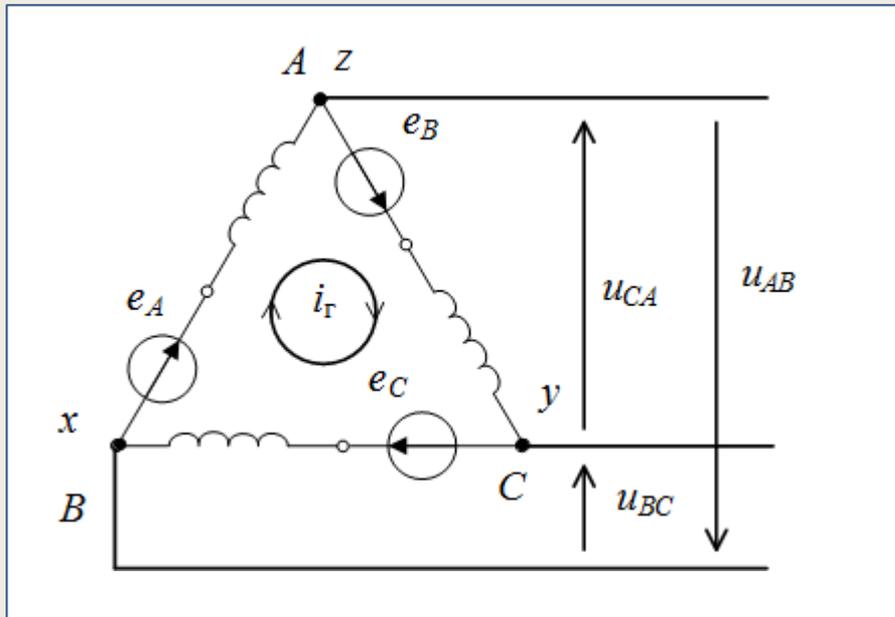
$$U_{V1} = \sqrt{\left(\frac{U_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{5m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{7m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{9m}}{\sqrt{2}}\right)^2},$$

действующее значение линейного напряжения:

$$U_{V2} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}U_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}U_{5m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}U_{7m}}{\sqrt{2}}\right)^2}.$$

Высшие гармоники в трехфазных цепях

Соединим фазные обмотки генератора или трансформатора «треугольником». Пусть фазные ЭДС содержат высшие гармоники.



для k -ой гармоники

$$\underline{I}_{\Gamma}^{(k)} = \frac{\underline{E}_A^{(k)} + \underline{E}_B^{(k)} + \underline{E}_C^{(k)}}{3Z_{\Gamma}^{(k)}}$$

$$\underline{I}_{\Gamma}^{(k)} = \begin{cases} 0, & k \neq 3n \\ \frac{\underline{E}_A^{(k)}}{Z_{\Gamma}^{(k)}}, & k = 3n \end{cases}$$

$$\underline{U}_{AB}^{(k)} = \underline{E}_A^{(k)} - \underline{I}_{\Gamma}^{(k)} Z_{\Gamma}^{(k)}$$

$$\Rightarrow \underline{U}_{AB}^{(k)} = \begin{cases} \underline{E}_A^{(k)}, & k \neq 3n \\ 0, & k = 3n \end{cases}$$

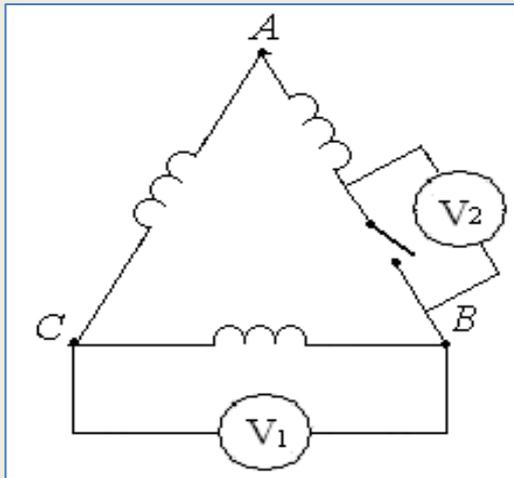
Если вторичные обмотки трехфазного генератора (трансформатора) соединены **треугольником**, в контуре генератора или трансформатора **возникает ток нулевой последовательности** даже при отсутствии внешней цепи. При наличии внутренних сопротивлений фаз генератора (трансформатора) напряжение на этих фазах, обусловленные этим током, должны компенсировать суммарную ЭДС. Поэтому **линейные напряжения не содержат гармоник, кратных трем.**

Высшие гармоники в трехфазных цепях

Пример 3. Вторичные обмотки трехфазного трансформатора соединены треугольником, фазное напряжение

$$u_{\phi} = U_{1m} \sin \omega t - U_{3m} \sin 3\omega t + U_{5m} \sin 5\omega t - U_{7m} \sin 7\omega t + U_{9m} \sin 9\omega t.$$

Найти показания вольтметров электромагнитной системы при разомкнутом ключе.



Решение: при разомкнутом ключе действующее значение фазного напряжения

$$U_{V1} = \sqrt{\left(\frac{U_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{5m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{7m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{9m}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

действующее значение суммы фазных напряжений

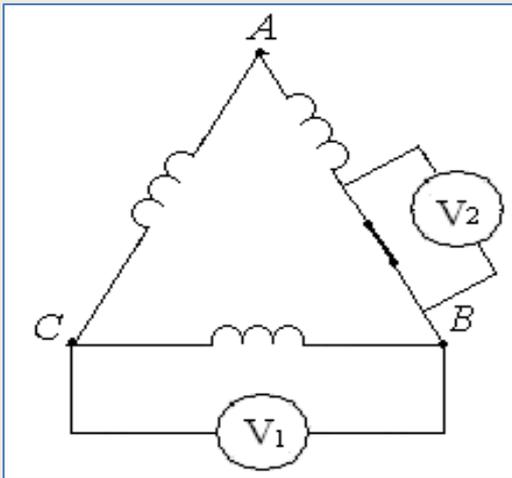
$$U_{V2} = \sqrt{\left(3 \cdot \frac{U_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(3 \cdot \frac{U_{9m}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

Высшие гармоники в трехфазных цепях

Пример 4. Вторичные обмотки трехфазного трансформатора соединены треугольником, фазное напряжение

$$u_{\phi} = U_{1m} \sin \omega t - U_{3m} \sin 3\omega t + U_{5m} \sin 5\omega t - U_{7m} \sin 7\omega t + U_{9m} \sin 9\omega t.$$

Найти показания вольтметров электромагнитной системы при замкнутом ключе.



Решение: при замкнутом ключе действующее значение фазного (линейного) напряжения

$$U_{V1} = \sqrt{\left(\frac{U_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{5m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{7m}}{\sqrt{2}}\right)^2},$$

$$U_{V2} = 0$$

4.17. Расчет трехфазных цепей с источниками ЭДС, содержащими высшие гармоники

Расчет трехфазных цепей с источниками ЭДС, содержащими высшие гармоники, проводится **по методу наложения**. Для каждой гармоники рассматривается эквивалентная схема с учетом зависимости реактивных сопротивлений от частоты и последовательности, соответствующей номеру гармоники.

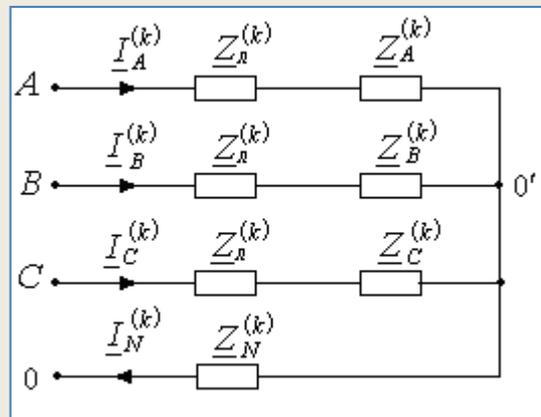
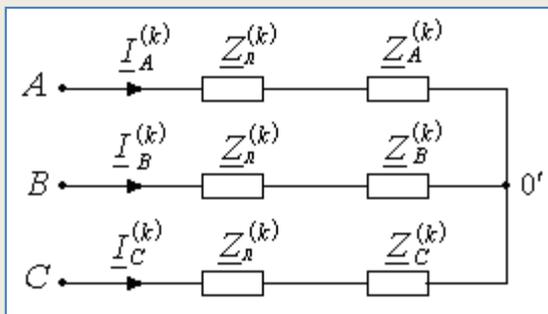
При соединении нагрузки **звездой без нейтрального провода** линейные напряжения не содержат гармоник, кратных трем. Линейные токи содержат только гармоники прямой ($k = 3n+1$) и обратной ($k = 6n-1$) последовательностей, и не содержат гармоники, кратные трем.

Расчет трехфазных цепей с источниками ЭДС, содержащими высшие гармоники

Напряжение смещения нейтрали при симметричной нагрузке

не содержит гармоник, соответствующих прямой и обратной последовательностям. Однако, между нейтралью генератора и нейтралью приемника появляется напряжение смещения нейтрали гармоник, кратных трем $k = 3n$. Это напряжение тройной частоты может достигать очень больших значений, опасных для персонала.

Составляется **комплексная расчетная схема k -ой гармоники** с учетом соответствия последовательности чередования фаз



$$\underline{E}_A^{(k)}, \underline{E}_B^{(k)}, \underline{E}_C^{(k)}$$

$$\underline{Z}_A^{(k)}, \underline{Z}_B^{(k)}, \underline{Z}_C^{(k)}, \underline{Z}_L^{(k)}$$

$$\underline{Z}_N^{(k)}$$

Расчет трехфазных цепей с источниками ЭДС, содержащими высшие гармоники

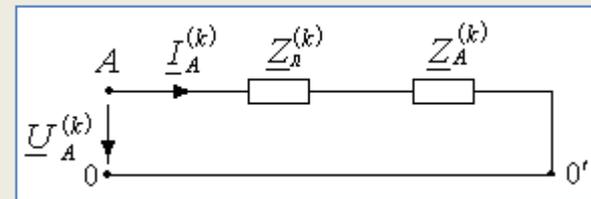
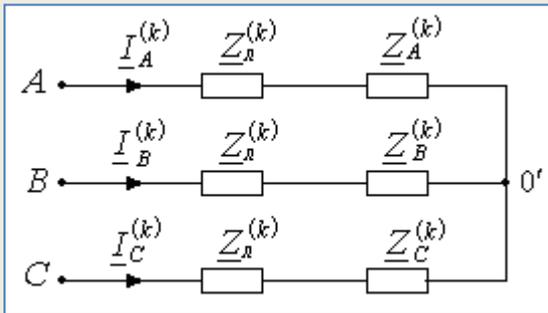
Расчетные схемы *k*-ой гармоники трехпроводной системы (симметричный режим)

однофазная расчетная схема

$$\underline{Z}_A^{(k)} = \underline{Z}_B^{(k)} = \underline{Z}_C^{(k)}$$

$$k \neq 3n, n=1,2,\dots$$

$$\underline{U}_{0'0}^{(k)} = 0$$



для прямой последовательности $k = 1, 7, \dots$

$$\underline{I}_B^{(k)} = \underline{I}_A^{(k)} \angle -120^\circ = a^2 \underline{I}_A^{(k)} \quad \underline{I}_C^{(k)} = \underline{I}_A^{(k)} \angle 120^\circ = a \underline{I}_A^{(k)}$$

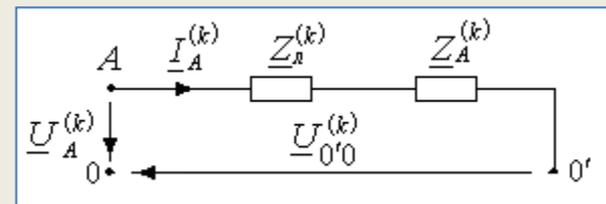
для обратной последовательности $k = 5, 11, \dots$

$$\underline{I}_B^{(k)} = \underline{I}_A^{(k)} \angle 120^\circ = a \underline{I}_A^{(k)} \quad \underline{I}_C^{(k)} = \underline{I}_A^{(k)} \angle -120^\circ = a^2 \underline{I}_A^{(k)}$$

для нулевой последовательности $k = 9, 15, \dots$

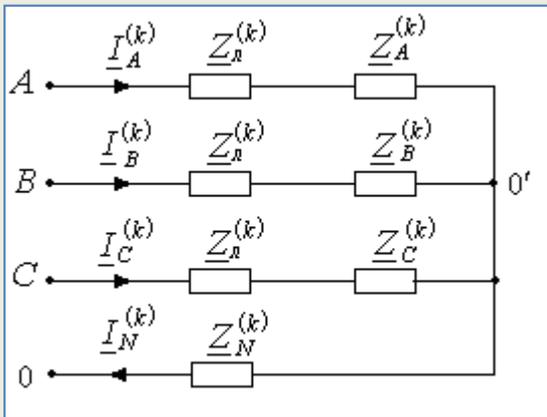
$$\underline{U}_\Pi^{(k)} = 0 \quad \underline{I}_A^{(k)} + \underline{I}_B^{(k)} + \underline{I}_C^{(k)} = 0$$

$$\underline{I}_A^{(k)} = \underline{I}_B^{(k)} = \underline{I}_C^{(k)} = 0 \quad \underline{U}_{0'0}^{(k)} = \underline{U}_A^{(k)}$$



Расчет трехфазных цепей с источниками ЭДС, содержащими высшие гармоники

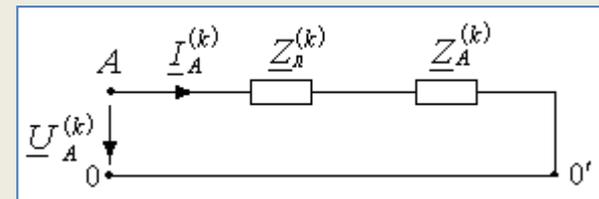
Расчетные схемы *k*-ой гармоники четырехпроводной системы (симметричный режим) $\underline{Z}_A^{(k)} = \underline{Z}_B^{(k)} = \underline{Z}_C^{(k)}$



$$k \neq 3n, n=1,2,\dots$$

$$\underline{U}_{0'0}^{(k)} = 0$$

однофазная расчетная схема фазы А



$$U_{\text{л}}^{(k)} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}^{(k)}$$

для прямой последовательности $k = 1, 7, \dots$

$$\underline{I}_B^{(k)} = \underline{I}_A^{(k)} \angle -120^\circ = a^2 \underline{I}_A^{(k)} \quad \underline{I}_C^{(k)} = \underline{I}_A^{(k)} \angle 120^\circ = a \underline{I}_A^{(k)}$$

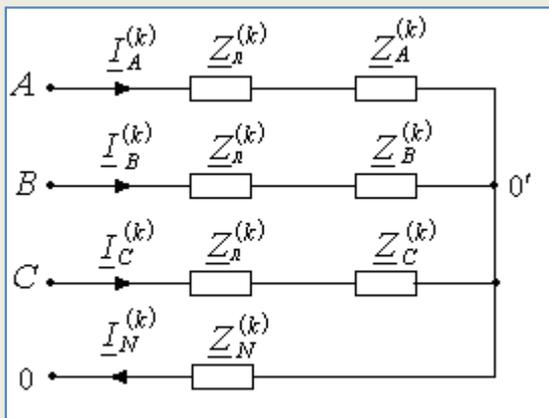
для обратной последовательности $k = 5, 11, \dots$

$$\underline{I}_B^{(k)} = \underline{I}_A^{(k)} \angle 120^\circ = a \underline{I}_A^{(k)} \quad \underline{I}_C^{(k)} = \underline{I}_A^{(k)} \angle -120^\circ = a^2 \underline{I}_A^{(k)}$$

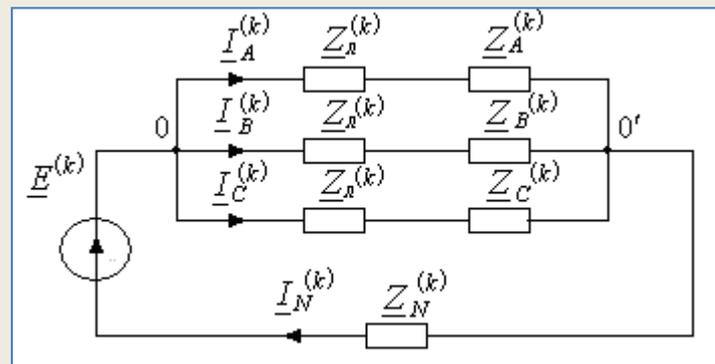
Расчет трехфазных цепей с источниками ЭДС, содержащими высшие гармоники

Расчетные схемы четырехпроводной системы (симметричный режим) $\underline{Z}_A^{(k)} = \underline{Z}_B^{(k)} = \underline{Z}_C^{(k)}$

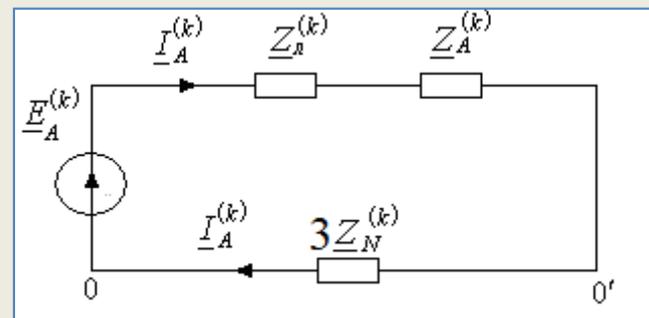
для нулевой последовательности $k = 9, 15, \dots$



трехфазная расчетная схема



однофазная расчетная схема (фазы А)



$$\underline{E}_A^{(k)} = \underline{E}_B^{(k)} = \underline{E}_C^{(k)} = \underline{E}^{(k)}$$

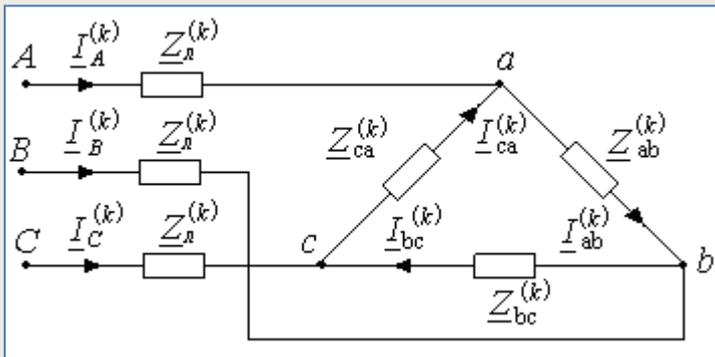
$$U_{\text{л}}^{(k)} = 0$$

$$\underline{I}_A^{(k)} + \underline{I}_B^{(k)} + \underline{I}_C^{(k)} = \underline{I}_N^{(k)}$$

$$\underline{I}_N^{(k)} = 3\underline{I}_A^{(k)}$$

Расчет трехфазных цепей с источниками ЭДС, содержащими высшие гармоники

Расчетная схема *k*-ой гармоники трехпроводной системы с соединением фаз нагрузки «треугольником» (симметричный режим) $\underline{Z}_{AB}^{(k)} = \underline{Z}_{BC}^{(k)} = \underline{Z}_{CA}^{(k)}$



Фазные и линейные токи не содержат гармоник, кратных трем

$$I_{\text{л}}^{(k)} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}^{(k)} \quad k \neq 3n, \quad n=1,2,\dots$$

$$I_{\text{л}}^{(k)} = I_{\text{ф}}^{(k)} = 0 \quad k = 3n, \quad n=1,2,\dots$$

$$U_{\text{л}}^{(k)} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}^{(k)} \quad k \neq 3n, \quad n=1,2,\dots \quad U_{\text{л}}^{(k)} = 0 \quad k = 3n, \quad n=1,2,\dots$$

После расчета комплексным методом всех гармоник находят по принципу наложения мгновенные значения напряжений и токов:

$$i(t) = \sum_k i^{(k)}(t) \quad u(t) = \sum_k u^{(k)}(t)$$

Автор доц. каф. ТОЭ НИУ «МЭИ»
Жохова М.П.



ZhokhovaMP@mpei.ru