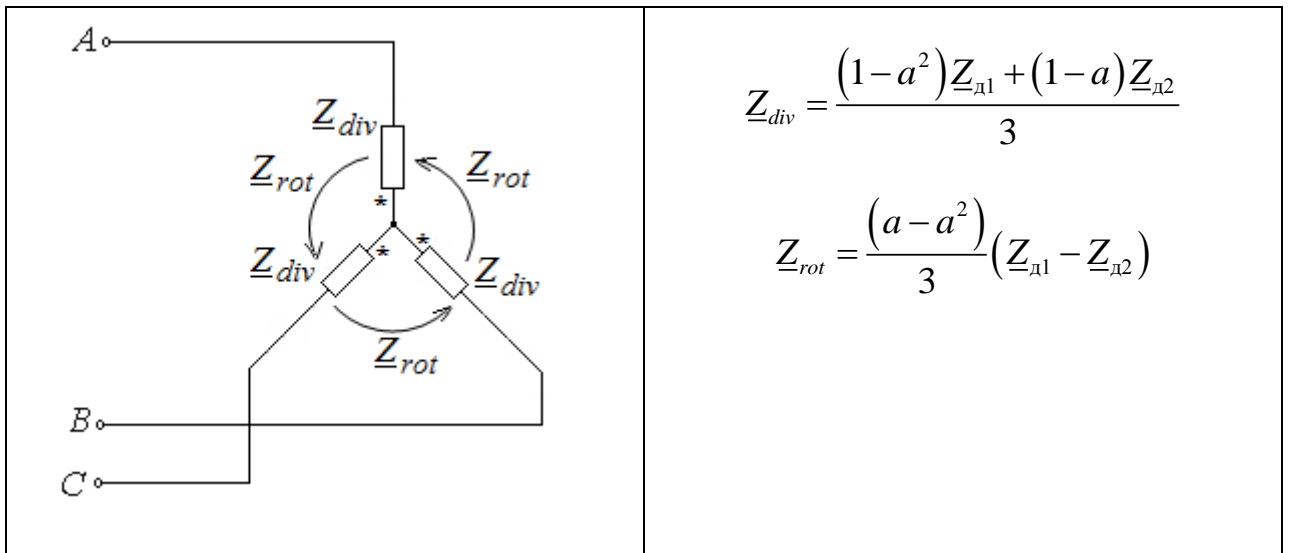


4.13 Метод системных схем замещения

Расчет МСС основан на разложении несимметричной тройки напряжений или токов на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности и последующем составлении однофазных симметричных расчетных схем прямой, обратной и нулевой последовательности. Реальных токи и напряжения трехфазной цепи рассчитываются после определения соответствующих симметричных составляющих. Метод **системных схем замещения** предполагает расчет токов и напряжений несимметричных режимов трехфазных цепей с динамической нагрузкой без разложения на симметричные составляющие. Системные модели могут содержать управляемые источники: ИНУТ (для Z-схем) и ИТУН (для Y-схем) (М.А. Шакиров, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, 2003 г., №10) или рассчитанные по специальным формулам комплексные сопротивления, учитывающие сопротивления на фазу прямой, обратной и нулевой последовательностей. Системная модель будет содержать индуктивные связи, но не будет обладать свойством взаимности. В Таблице 4.1. приведены системные модели (схемы замещения) для синхронного генератора (СГ) и асинхронного двигателя (АД) с соединением фаз "звездой" и расчетные формулы параметров схем замещения (ПРАКТИКУМ ПО ТОЭ. Под ред. Шакирова М.А.: СПб, Изд-во Политехнического института, 2006 г.) Комплексные ЭДС генератора \underline{E}_A , $\underline{E}_B = a^2 \underline{E}_A$, $\underline{E}_C = a \underline{E}_A$; сопротивления генератора \underline{Z}_{r1} , \underline{Z}_{r2} , \underline{Z}_{r0} ; двигателя \underline{Z}_{d1} , \underline{Z}_{d2} .

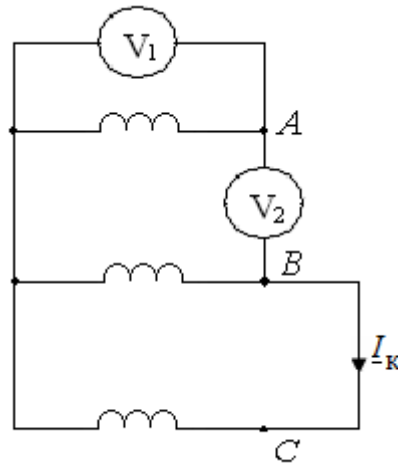
Таблица 4.1

Схема замещения	Параметры схемы замещения
	$\underline{Z}_{div} = \frac{(1-a^2)\underline{Z}_{r1} + (1-a)\underline{Z}_{r2}}{3}$ $\underline{Z}_{rot} = \frac{(a-a^2)}{3}(\underline{Z}_{r1} - \underline{Z}_{r2})$ $\underline{Z}_N = \frac{\underline{Z}_{r0} + a^2 \underline{Z}_{r1} + a \underline{Z}_{r2}}{3}$



Рассмотрим примеры использования метода системных моделей для расчета несимметричных режимов в трехфазных цепях при динамических нагрузках.

Пример 4.1 Определить показания вольтметров и ток в фазе В (ток короткого замыкания) при двухфазном коротком замыкании генератора. Комплексные ЭДС генератора $\underline{E}_A = E_\phi \angle 0$, $\underline{E}_B = a^2 \underline{E}_A$, $\underline{E}_C = a \underline{E}_A$; сопротивления генератора \underline{Z}_{r1} , \underline{Z}_{r2} , \underline{Z}_{r0} .

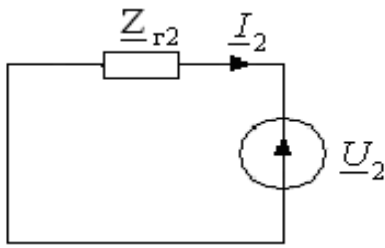


Решение:

Используем МСС. Несимметричный участок с напряжениями \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C представим суммой симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей и токами несимметричного участка \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C :

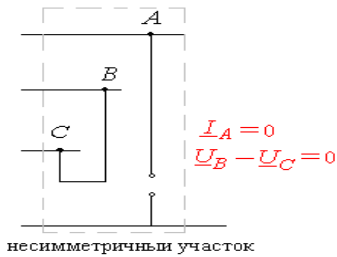
$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 & \underline{I}_A &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{U}_B &= a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0 & \underline{I}_B &= a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{U}_C &= a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0 & \underline{I}_C &= a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \end{aligned}$$

1) Прямая последовательность, эквивалентная расчетная схема:



$$\underline{U}_1 = E_\phi \angle 0 - \underline{Z}_{r1} \underline{I}_1 \quad (1)$$

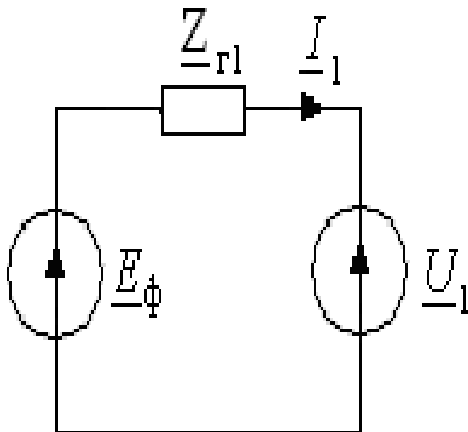
2) Обратная последовательность, эквивалентная расчетная схема:



$$\underline{U}_2 = -\underline{Z}_{r2} \underline{I}_2 \quad (2)$$

3) Токов нулевой последовательности нет (отсутствует нулевой провод), $\underline{I}_0 = 0$ и $\underline{U}_0 = 0$ (3)

Граничные условия (дополнительные уравнения):



$$\underline{I}_A = 0 \quad \text{или} \quad \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 0 \quad (4)$$

$$\underline{I}_B + \underline{I}_C = 0 \quad \text{или}$$

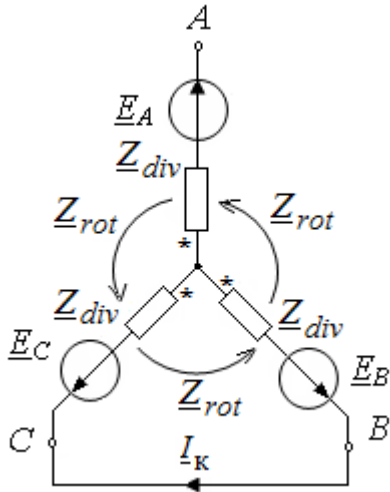
$$(a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2) + (a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2) = 0 \quad (5)$$

$$\underline{U}_B - \underline{U}_C = 0 \quad \text{или}$$

$$(a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2) - (a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2) = 0 \quad (6)$$

После совместного решения шести уравнений, с учетом $\underline{U}_1 = \underline{U}_2$ и $\underline{I}_2 = -\underline{I}_1$ получаем решение для симметричных составляющих. Ток короткого замыкания $\underline{I}_B = (a^2 - a) \underline{I}_1$, показание первого вольтметра $\underline{U}_A = 2\underline{U}_1$, второго вольтметра $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = 2\underline{U}_1 - (a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_1) = 3\underline{U}_1$.

Используем метод **системных схем замещения**.

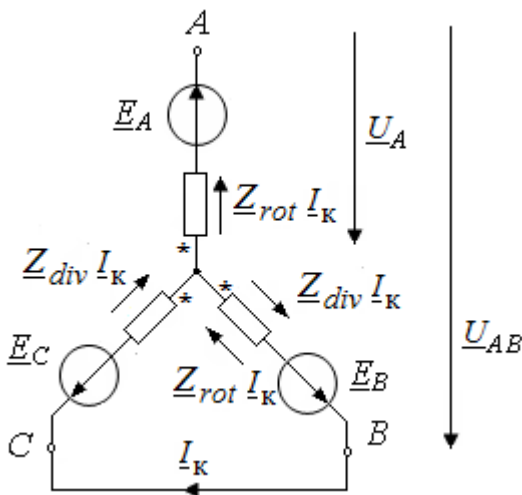


Рассчитаем параметры схемы замещения:

$$\underline{Z}_{div} = \frac{(1-a^2)\underline{Z}_{r1} + (1-a)\underline{Z}_{r2}}{3}$$

$$\underline{Z}_{rot} = \frac{(a-a^2)}{3}(\underline{Z}_{r1} - \underline{Z}_{r2})$$

Составим уравнения Кирхгофа для контура с током короткого замыкания $\underline{I}_k = \underline{I}_B$ с учетом напряжений взаимной индукции



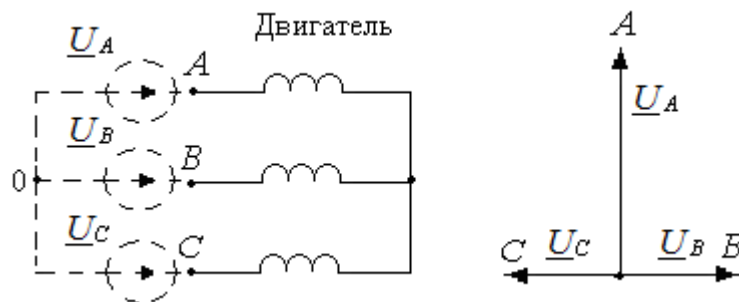
$$\underline{E}_B - \underline{E}_C = \underline{I}_k \underline{Z}_{div} - \underline{I}_k \underline{Z}_{rot} + \underline{I}_k \underline{Z}_{div},$$

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{E}_B - \underline{E}_C}{2\underline{Z}_{div} - \underline{Z}_{rot}}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_k, \quad \underline{I}_C = -\underline{I}_k,$$

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A - \underline{I}_k \underline{Z}_{rot},$$

$$\underline{U}_{AB} = \underline{E}_A - \underline{E}_B + \underline{I}_k (\underline{Z}_{div} - 2\underline{Z}_{rot})$$

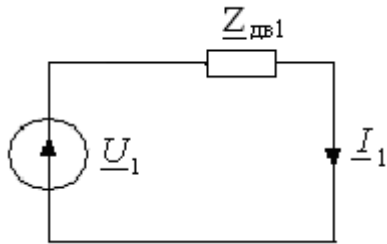
Пример 4.2 К асинхронному двигателю приложено напряжение генератора с фазными напряжениями, представленными на векторной диаграмме. Сопротивления последовательностей двигателя $\underline{Z}_{дв1}$, $\underline{Z}_{дв2}$. Найти токи в фазах двигателя.



Решение:

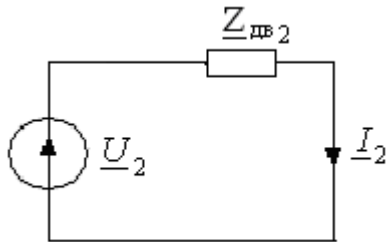
Используем **МСС**. Разложим несимметричную систему линейных напряжений по симметричным составляющим: $\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)$, $\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C)$, $\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C)$. Составим расчетные однофазные схемы прямой, обратной и нулевой последовательности.

1) Прямая последовательность



$$\underline{I}_{д1} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{д1}}$$

2) Обратная последовательность



$$\underline{I}_{д2} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{д2}}$$

Токов нулевой последовательности нет. Токи в фазах двигателя:
 $\underline{I}_A = \underline{I}_{д1} + \underline{I}_{д2}$; $\underline{I}_B = a^2 \underline{I}_{д1} + a \underline{I}_{д2}$; $\underline{I}_C = a \underline{I}_{д1} + a^2 \underline{I}_{д2}$.

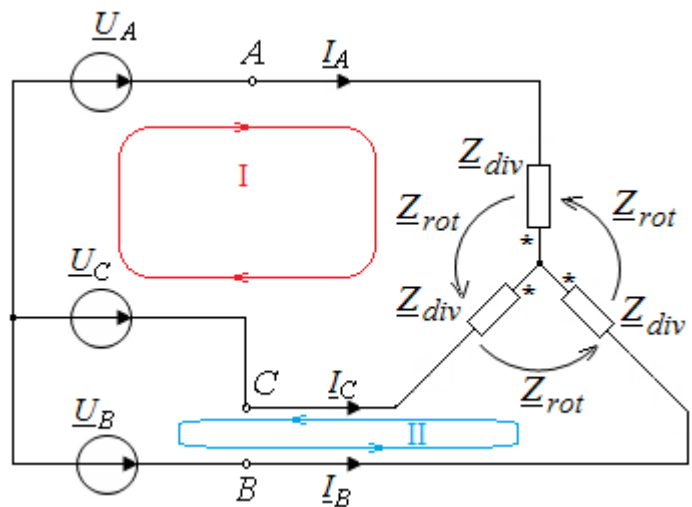
Используем метод **системных схем замещения**.

Рассчитаем параметры схемы замещения АД:

$$\underline{Z}_{div} = \frac{(1-a^2)\underline{Z}_{д1} + (1-a)\underline{Z}_{д2}}{3},$$

$$\underline{Z}_{rot} = \frac{(a-a^2)}{3}(\underline{Z}_{д1} - \underline{Z}_{д2})$$

и составим расчетную схему.



Составим контурные уравнения для выбранных контуров:

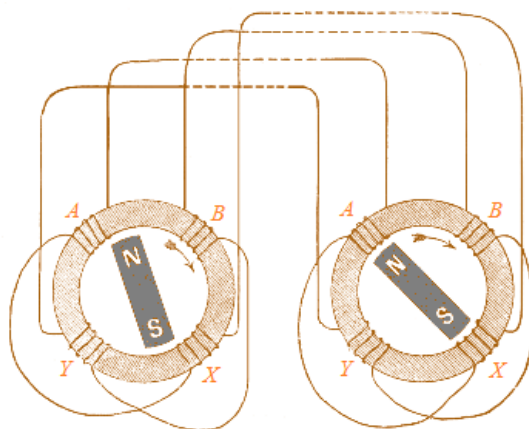
$$I_1(2Z_{div} - Z_{rot}) + I_{II}(Z_{div} + Z_{rot}) = \underline{E}_A - \underline{E}_C$$

$$I_1(Z_{div} - 2Z_{rot}) + I_{II}(2Z_{div} - Z_{rot}) = \underline{E}_B - \underline{E}_C$$

Токи трехфазной цепи $I_A = I_1$, $I_B = I_{II}$, $I_C = -(I_1 + I_{II})$

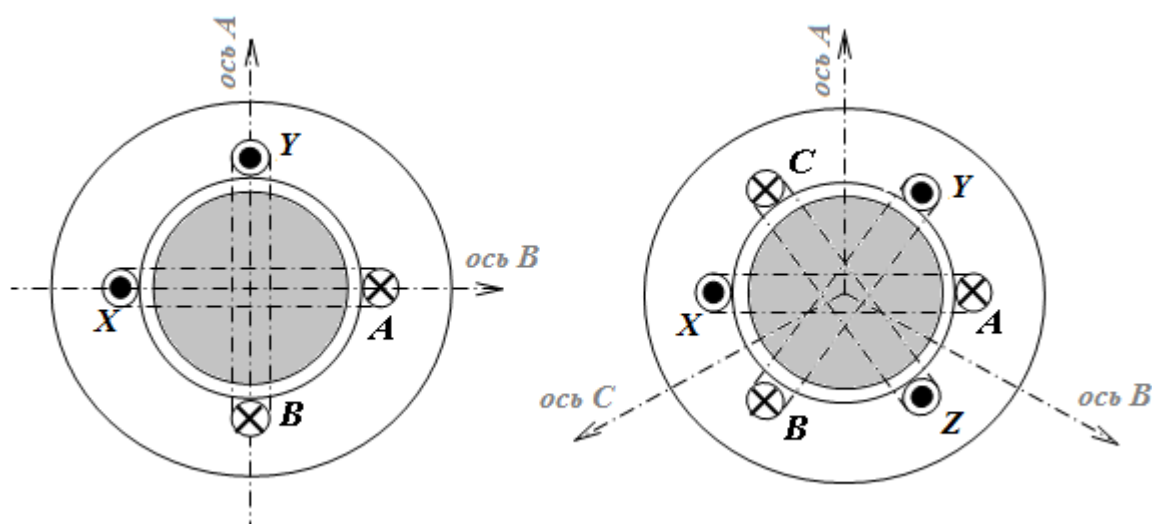
4.14 Вращающееся магнитное поле

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. 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.



Принцип действия двухфазного генератора и двигателя.

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. 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.

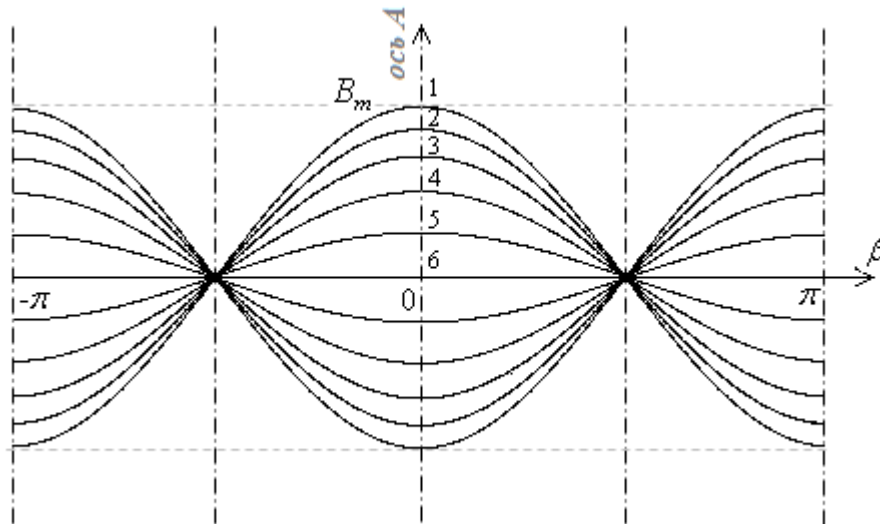


Двухфазная и трехфазная система

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.

Рассмотрим магнитное поле одной фазы обмотки электрической машины. Для обмотки A - X ось магнитного потока - ось A (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 $i(t) = I_m \sin \omega t$ 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 A , то магнитная индукция меняется по закону $B(t) = B_m \sin \omega t \cos \beta$, где B_m - магнитная индукция на оси A ($\beta = 0$) при токе $i = I_m$. В точках, расположенных от оси A по окружности $\beta = \pm \frac{\pi}{3}$ наибольшая величина магнитной индукции равна $B_m \cos(\pm \frac{\pi}{3}) = \frac{B_m}{2}$. В плоскости нейтрали $\beta = \pm \frac{\pi}{2}$ и магнитная индукция равна нулю при любом значении тока. Магнитное поле одной обмотки с синусоидальным током - пульсирующее.



На рисунке показано пульсирующее магнитное поле обмотки: β - угол по окружности статора, отсчитанный от оси A ; (1...6) – шесть различных моментов времени: $\omega t_1 = \pi/2 = 90^\circ$ ($t_1 = T/4$) ... $\omega t_6 = 0^\circ$ ($t_6 = 0$).

Используя тригонометрическую формулу можно разложить индукцию на две составляющие: $B(t) = B_m \sin \omega t \cos \beta = \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin(\omega t - \beta)}_{B'} + \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin(\omega t + \beta)}_{B''} = B' + B''$. Таким

образом, пульсирующее поле математически раскладывается на два синусоидальных магнитных поля с одинаковой амплитудой $\frac{B_m}{2}$, одно из которых вращается в порядке следования фаз A, B, C , а другое - в противоположную сторону (прямые и обратные составляющие). 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.

Токи в обмотках прямой последовательности чередования фаз: $i_A(t) = I_m \sin \omega t$, $i_B(t) = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$, $i_C(t) = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$. Тогда пульсирующее магнитное поле каждой

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

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

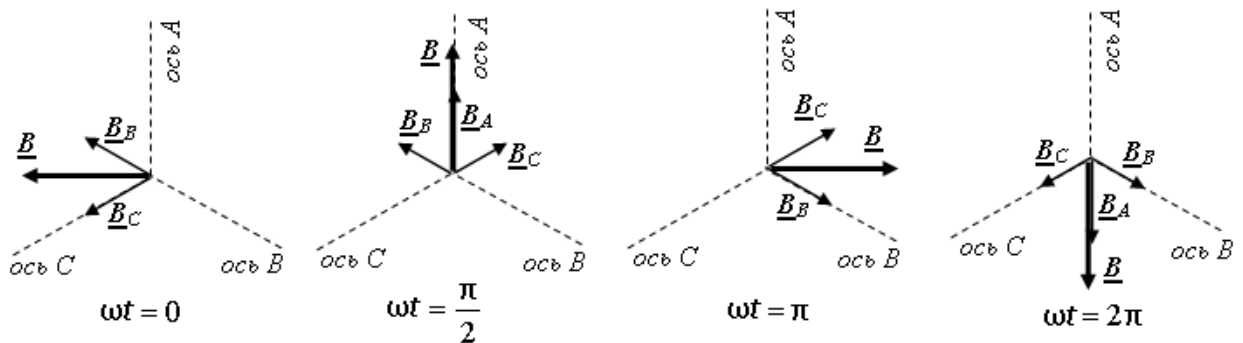
$$B_C(t) = B_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) = \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin(\omega t - \beta)}_{B'_C} + \underbrace{\frac{B_m}{2} \sin(\omega t + \beta + \frac{4\pi}{3})}_{B''_C} = B'_C + B''_C$$

Поля всех трех катушек складываются, причем обратные составляющие в сумме дают ноль, а прямые составляющие складываются и дают результирующее магнитное поле с индукцией $\frac{3B_m}{2}$, одинаковое во всех точках пространства и в любой момент времени,

вращающееся с одинаковой угловой скоростью ω в порядке следования фаз A, B, C , т.е. по часовой стрелке: $B' = B'_A + B'_B + B'_C = \frac{3B_m}{2} \sin(\omega t - \beta)$, $B'' = B''_A + B''_B + B''_C = 0$. Таким

образом, результирующая магнитная индукция $B = \frac{3B_m}{2} \sin(\omega t - \beta)$. Максимум индукции

$B_{\max} = \frac{3B_m}{2}$ 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.



Результирующая магнитная индукция в различные моменты времени

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.

Угловая частота, с которой магнитное поле вращается в пространстве полностью определяется частотой питающей сети и электрической схемой обмоток. Если увеличить число витков вдвое и соединить их в обмотки так, чтобы по окружности пакета статора располагались две чередующиеся пары групп с одинаковым направлением тока, то образуется магнитное поле с двумя парами полюсов. Оно также будет вращаться в пространстве, перемещаясь за один период колебаний токов на угол соответствующий расстоянию между одноименными полюсами, т.е. на 180° . Значит, угловая скорость вращения поля будет вдвое меньшей. Таким образом, угловая частота вращения магнитного поля равна $n = \frac{60 \cdot f_1}{p}$ [об/мин] или $\omega = \frac{2\pi f_1}{p}$ [рад/с], где f_1 - частота питающей сети, а p - число пар полюсов обмотки статора. Отсюда возникает ряд возможных скоростей вращения магнитного поля для промышленной сети частотой 50 Гц: 3000, 1500, 1000, 750, 600 [об/мин].

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.

При подключении обмоток статора к сети трехфазного синусоидального тока частотой f_1 в воздушном зазоре между статором и ротором возникает *вращающееся магнитное поле*. Магнитные линии пересекают площадку, образованную обмотками неподвижного статора, и индуцируют синусоидальную ЭДС, частота которой равна частоте тока в обмотке статора. В момент пуска двигателя ЭДС, индуцированная в обмотке ротора, имеет максимальное значение и ток в обмотке ротора в несколько раз превышает номинальный ток. Токи ротора, взаимодействуя с вращающимся полем статора, создают вращающийся момент, под действием которого ротор начинает вращаться в сторону вращения поля статора. Ротор при своем вращении всегда отстает от угловой скорости вращения магнитного поля статора, т.е. вращается *асинхронно*. Если n_1 - угловая скорость вращения вращающегося магнитного поля (синхронная скорость), n_2 - угловая скорость вращения ротора двигателя, то *скольжение двигателя* определяется по формуле $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$. В момент пуска двигателя $n_2 = 0$ скольжение $s = \frac{n_1}{n_1} = 1$, при холостом ходе $n_2 \approx n_1$ и $s \approx 0$, при номинальной нагрузке $s \approx 0,03 \div 0,06$, для двигателей большой

мощности $s \approx 0,01 \div 0,03$. Скольжение двигателя в зависимости от нагрузки меняется незначительно, частота синусоидальных токов в роторе f_2 при постоянном скольжении определяется как $f_2 = sf_1$. Увеличение нагрузки на валу двигателя вызывает увеличение тока в обмотке ротора, из-за магнитной связи между обмотками статора и ротора это вызывает увеличение тока в статоре.

При решении задач используют схемы замещения асинхронного двигателя для прямой, обратной и нулевой последовательности или составляют системные схемы замещения АД. Также как и в случае синхронных генераторов сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей для асинхронного двигателя - разные. 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. 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.