

## *1.4 Обобщенная электрическая машина*

ЭМ представляют собой определенную комбинацию в пространстве обмоток, в которых протекают токи, сдвинутые во времени на определенный угол.

Вращающееся магнитное поле может быть создано двухфазной системой токов, если неподвижные обмотки сдвинуты в пространстве на  $90^{\circ}$ , трехфазной системой токов – при сдвиге обмоток в пространстве на  $120^{\circ}$  и токов во времени на  $120^{\circ}$ .

В общем случае вращающееся поле создается *m-фазной* системой токов при сдвиге обмоток в пространстве на  $360^0/m$  и токов при сдвиге во времени на  $360^0/m$  .

Вращающееся магнитное поле может создаваться и постоянным током. При этом обмотка, обтекаемая постоянным током, должна вращаться.

*Обмотки возбуждения* во всех ЭМ создают *магнитное поле*, в котором происходит электромеханическое преобразование энергии, но активная мощность поступает в воздушный зазор со стороны вала (генератор) или из сети (двигатель). В установившемся режиме от ОВ мощность не отбирается.

Магнитное поле в ЭМ переменного тока создается реактивными токами, которые также косвенно участвуют в процессе преобразования энергии.

Простейшая схема ЭМ – это двухфазная машина с двумя обмотками на статоре и двумя обмотками на роторе (рис.1.10). Обмотки статора сдвинуты в пространстве и в магнитном поле на  $90^0$  и обмотки ротора сдвинуты относительно друг друга на  $90^0$ . К обмоткам статора и ротора приложены соответствующие напряжения.

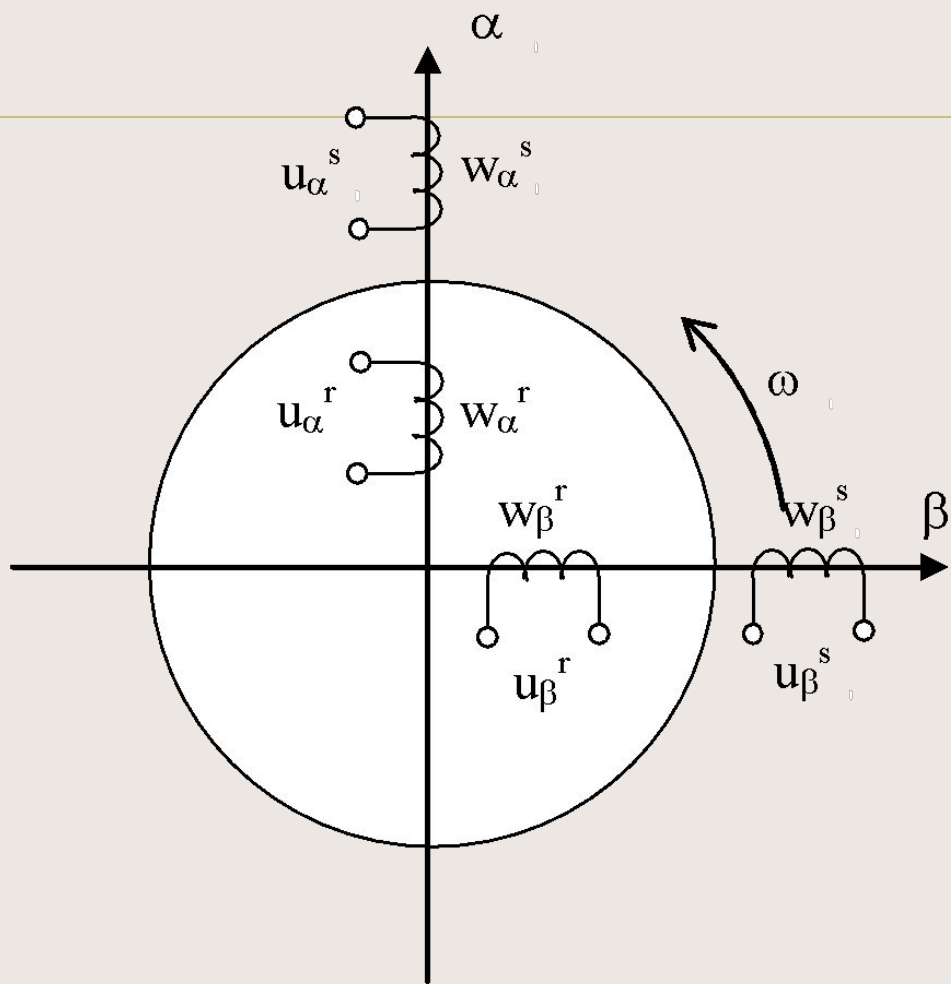


Рис. 1.10

Чтобы в воздушном поле двухфазной машины получить вращающееся магнитное поле, необходимо к обмоткам статора или ротора подвести напряжения, сдвинутые во времени на  $90^{\circ}$ . Тогда в обмотках будут протекать токи, сдвинутые во времени на  $90^{\circ}$ , и в воздушном зазоре появится вращающееся магнитное поле.

Исходя из третьего закона электромеханики – *неподвижности относительно друг друга полей статора и ротора* – электромеханическое преобразование энергии будет возможным при определенном соотношении частот вращения

$$\omega_0 = \omega \pm \omega_{\text{нр}}$$

где  $\omega_{\text{нр}}$  - частота вращения поля ротора относительно ротора.

При этом условии в воздушном зазоре магнитные поля статора и ротора неподвижны относительно друг друга.

При этом условии в воздушном зазоре магнитные поля статора и ротора неподвижны относительно друг друга. При изменении частоты вращения магнитного поля статора или ротора изменяется частота токов в роторе  $f_2 = f_1 s$ , но поля статора и ротора остаются неподвижными относительно друг друга.



В воздушном зазоре ЭМ (рис.1.10) круговое магнитное поле будет синусоидальным при следующих допущениях: на электрических выводах будет *синусоидальное напряжение* и ЭМ - *идеальная*.

В *идеальной ЭМ*:

- воздушный зазор равномерный и гладкий
- синусоидальные МДС
- ЭМ не насыщена и ее магнитная проницаемость равна бесконечности
- ЭМ симметричная, т.е. магнитная система, воздушный зазор и ее обмотки симметричны по осям

**$\alpha$  и  $\beta$**

Двухфазная двухполюсная идеальная ЭМ (рис.1.10) называется **обобщенной ЭМ** потому что к ней приводятся процессы преобразования энергии во всех основных типах индуктивных ЭМ.

В основе общей теории ЭМ лежат уравнения электромеханического преобразования энергии, которые адекватно описывают процессы в **реальной ЭМ**.

Рассмотрим двухполюсную машину. Т.к процессы преобразования энергии в симметричных многополюсных машинах можно свести к двухполюсной машине. Так для симметричной ЭМ можно подсчитать ЭДС, мощность и другие показатели в зоне двух полюсов, а затем, чтобы получить эти показатели для всей ЭМ, надо их умножить на число пар полюсов  $p$ .

При изучении ЭМ вводится понятие **электрического угла**, который связан с геометрическим углом

$$\alpha = p \cdot \alpha'$$

Все основные типы ЭМ (АМ, МПТ, СМ, трансформатор) можно свести к обобщенной ЭМ.

Несмотря на существенные отличия в конструкции и системе питающих напряжений, все ЭМ объединяет одно общее – они являются ЭМП. Когда ЭМ не преобразует электрическую энергию в механическую или механическую в электрическую, она является *электромагнитным преобразователем*.

Одна и та же ЭМ может работать как СМ и АМ, с преобразователем частоты (ПЧ) от сети постоянного тока и переменного тока. А также как электромагнитный преобразователь – трансформатор.

## *1.5. Магнитное поле машины*

---

Электромеханическое преобразование энергии происходит в воздушном зазоре ЭМ – в пространстве, где сосредоточена энергия магнитного поля.

*Магнитное поле ЭМ создается токами, протекающими в обмотках машины и представляет собой как пространство, заполненное магнитным потоком, который состоит из замкнутых силовых линий.*

По таким показателям магнитного поля как *магнитная индукция* и *напряженность магнитного поля* ЭМ можно определить все остальные показатели ЭМ. Однако расчет магнитного поля ЭМ может быть произведен только приближенно.

На рис.1.11 представлено распределение магнитных потоков в двухполюсной ЭМ без нагрузки. При нагрузке силовые линии магнитного поля деформируются и распределяются в участках магнитной системе неравномерно (рис.1.12).

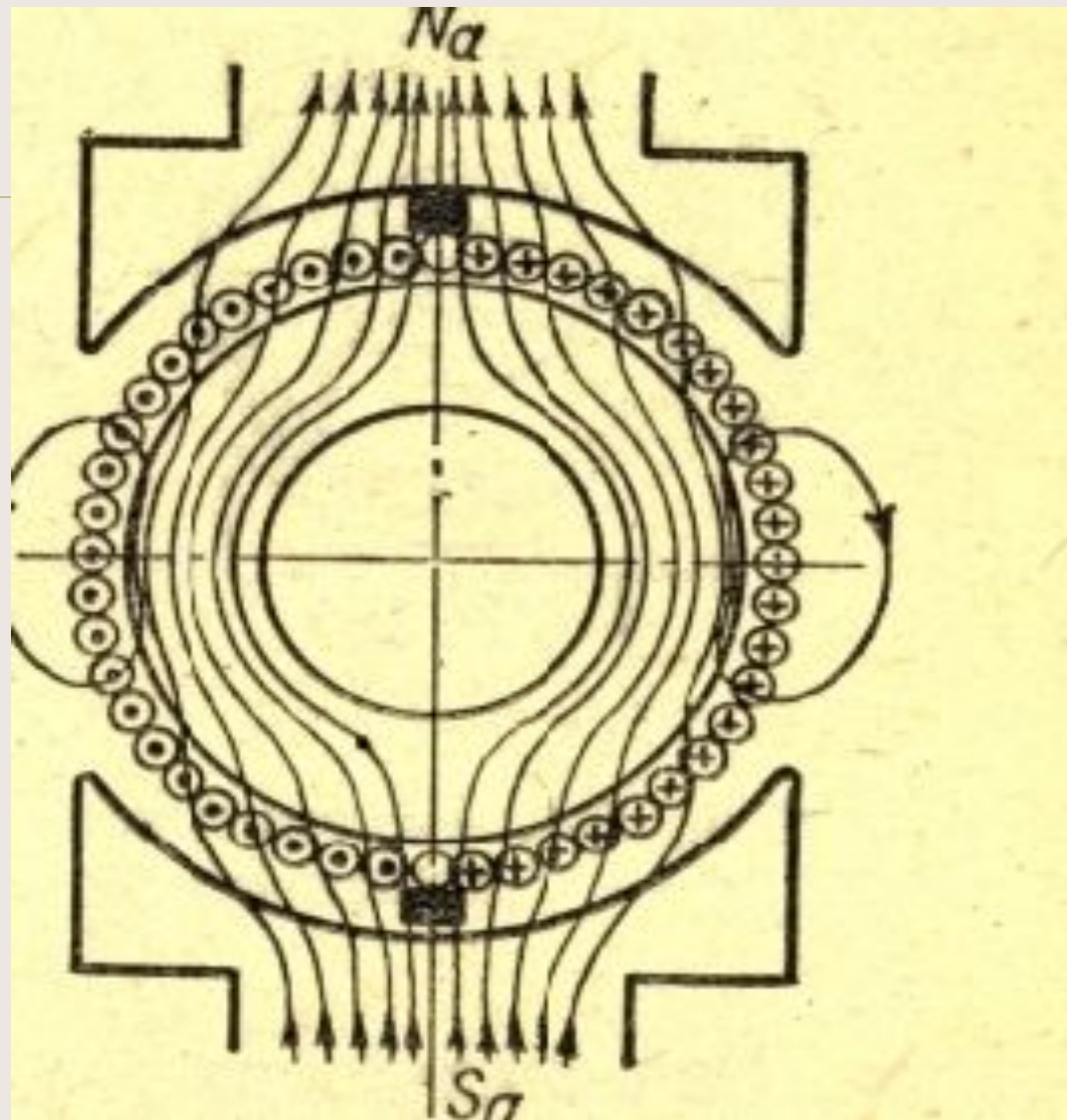


Рис. 1.11



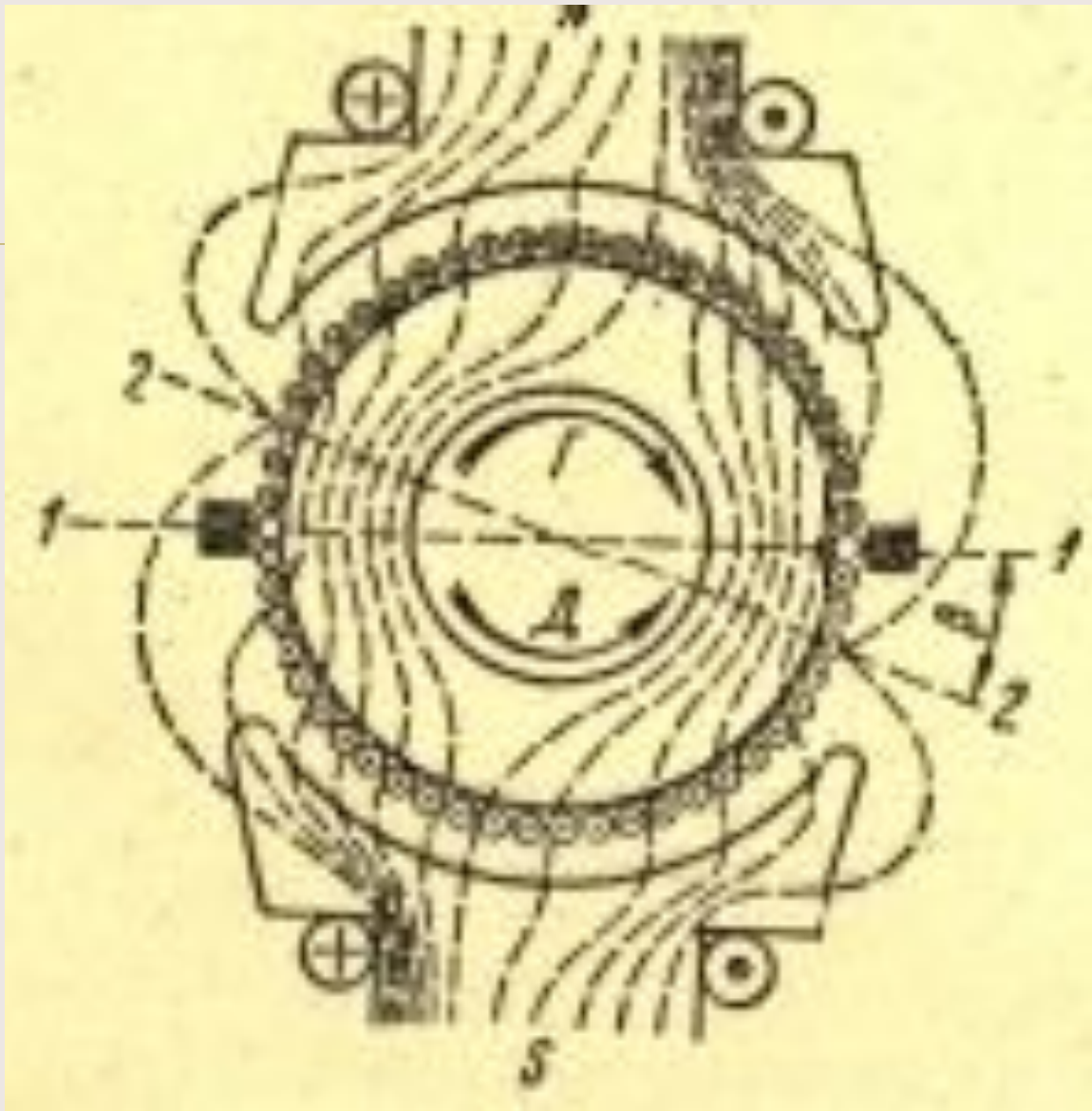


Рис.1.12

Картина магнитного поля зависит от нагрузки, приложенного напряжения, режима работы и геометрии магнитной системы. Форма поля, при этом, непрерывно изменяется.

Расчет магнитного поля состоит в определении *плотности магнитного потока*, т.е. *магнитной индукции* – вектора, направление которого в каждой точке поля совпадает с направлением силовых линий поля (рис.1.13).

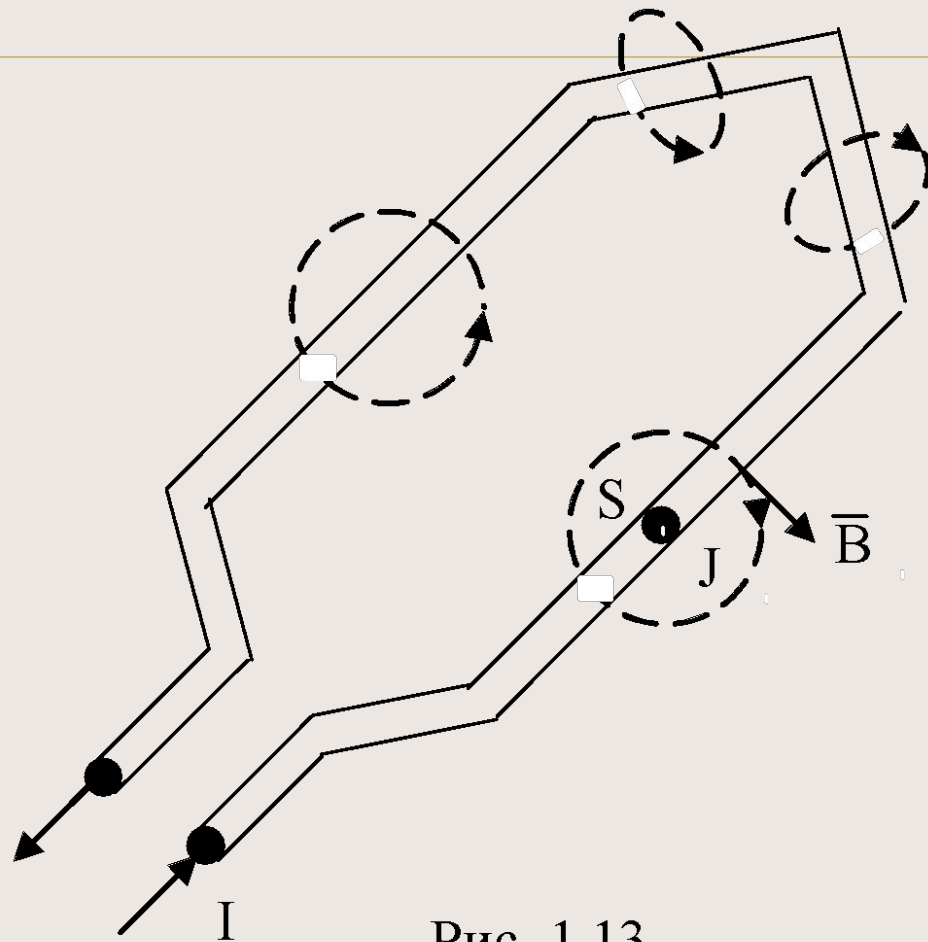


Рис. 1.13

Выражение для определения вектора напряженности магнитного поля

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{J} \quad (1.1)$$

Считая, что плотность тока  $\mathbf{J}$  равномерно распределена по сечению проводника  $S$

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{I}}{S} \quad (1.2)$$

Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля определяется

$$\bar{\mathbf{B}} = \mu_0 \cdot \bar{\mathbf{H}} \quad (1.3)$$

где  $\mu_0$  абсолютная магнитная проницаемость среды.

Так как силовые линии магнитного поля замыкаются, то

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{B}} = 0 \quad (1.4)$$

что свидетельствует о том, что силовые линии магнитного поля не имеют «стоков» и «источков».

Уравнения (1.1) – (1.4) позволяют аналитически найти магнитное поле лишь для ограниченного круга задач с простейшими граничными условиями. Магнитное поле в ЭМ значительно сложнее поля, представленного на рис. 1.13.

Обычно в ЭМ поле концентрируется в воздушном зазоре и в его создании участвуют несколько контуров с токами. Обмотки, как правило, располагаются в пазах, а магнитный поток замыкается как по стали, так и по воздуху, вокруг лобовых частей обмотки.

Для реальных областей ЭМ со сложными формами магнитных сердечников и контуров с токами при расчете поля приходится принимать некоторые допущений.

Так в воздушном зазоре ЭМ наряду с основной гармоникой поля существуют поля высших гармоник. При расчете ЭМ рабочим полем считают поток 1-й гармоники.



Для упрощения магнитное поле ЭМ может рассматриваться как стационарное. Электромеханическое преобразование энергии почти во всех ЭМ связано с вращающимся магнитным полем. При этом в понятие стационарного магнитного поля вкладывается тот смысл, что в любой момент времени амплитуда и форма магнитного поля остаются неизменными.

## *1.6. Обмотки ЭМ*

**Обмотки ЭМ** – это контура, в который протекают токи, создающие магнитное поле машины.

Конструктивные исполнения обмоток очень разнообразные: от массивных ферромагнитных цилиндров до сложных многофазных обмоток ЭМ переменного и постоянного тока.

*От конструкции обмоток зависят основные энергетические и массогабаритные характеристики*

**1.6.1 Устройство обмоток.** Обмотка якоря должна удовлетворять следующим требованиям:

- обмотка должна быть рассчитана на заданные значения напряжения и тока нагрузки, соответствующие номинальным значениям;
- обмотка должна иметь необходимую электрическую, механическую и термическую прочность, соответствующую достаточно продолжительный срок службы машины (до 15-20 лет);
- конструкция обмотки должна обеспечивать удовлетворительные условия токосъема с коллектора, без вредного искрения;

- расход материала при заданных эксплуатационных показателях (кпд и др.) должен быть минимальным;
- технология изготовления обмотки должна быть по возможности простой.

В современных МПТ якорная обмотка укладывается в пазах на внешней поверхности якоря. Такие обмотки называются *барабанными*.

Обмотки якорей подразделяются на *петлевые* и *волновые*. Существуют также обмотки, которые представляют собой сочетание этих двух обмоток.

Основным элементом каждой обмотки якоря является *секция*, которая состоит из одного или некоторого числа последовательно соединенных витков и присоединена своими концами к коллекторным пластинам (рис.1.14, рис.1.15).

В обмотках обычно все секции имеют одинаковое число витков. На схемах обмоток секции для простоты изображаются всегда одновитковыми.

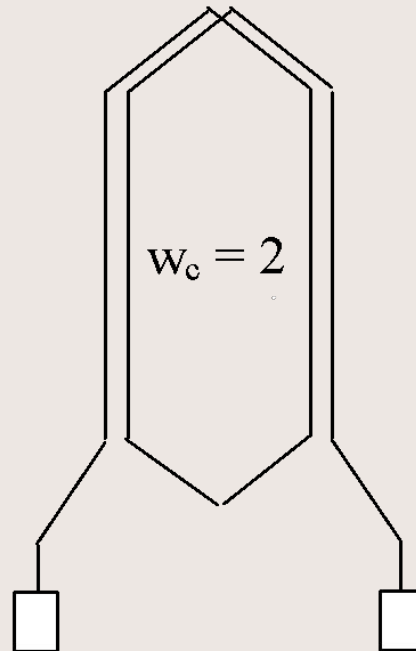
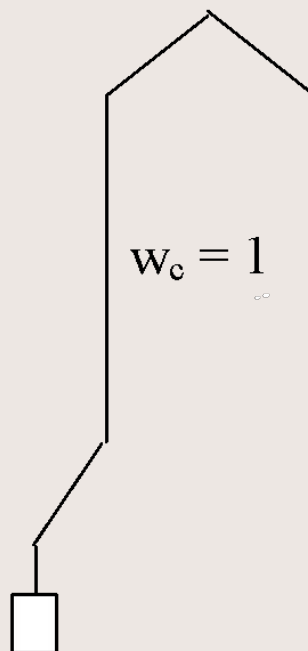
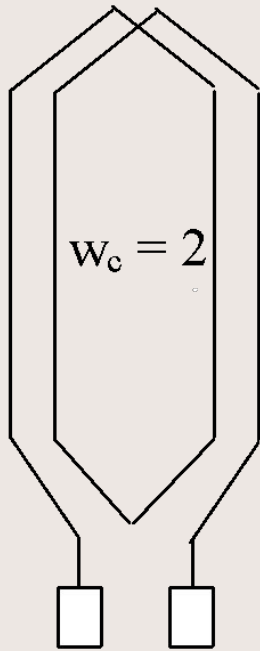
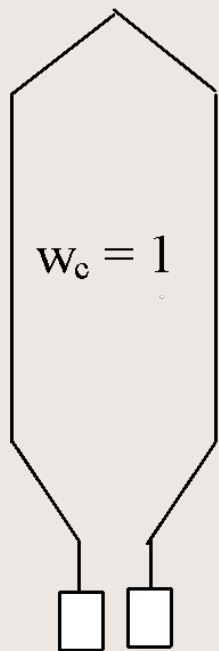


Рис. 1.14.

Рис. 1.15.

Для удобного расположения выходящих из пазов лобовых частей обмотки якоря выполняются *двухслойными*. При этом в каждом пазу секции располагаются в два слоя (рис.1.16): одна сторона каждой секции – в верхнем слое одного паза, а другая - в нижнем слое другого паза. На схемах обмоток стороны секций, находящиеся в верхнем слое, изображаются сплошными линиями, а стороны, расположенные в нижнем слое, - штрихованными линиями (рис.1.17).

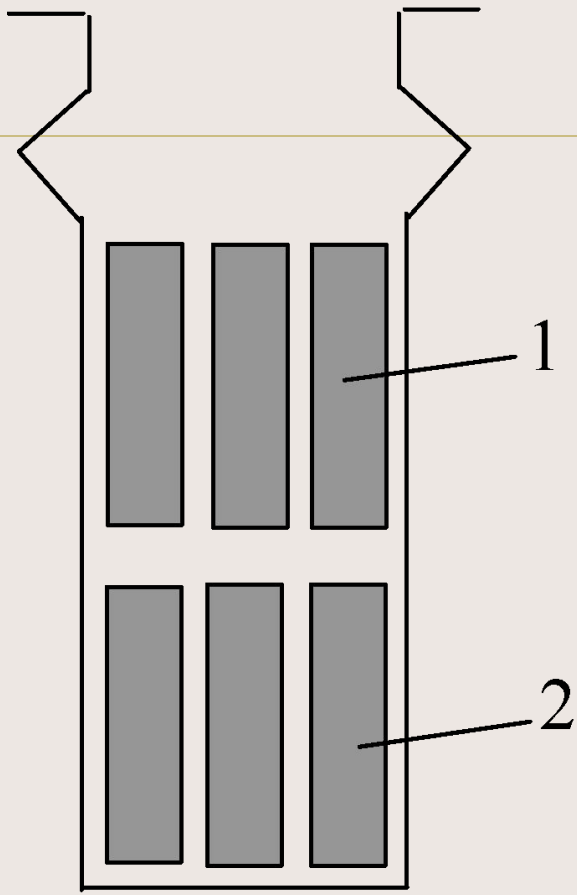
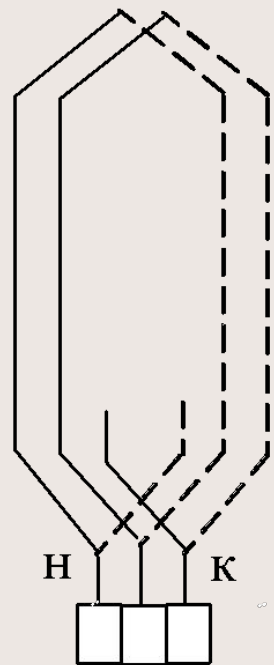
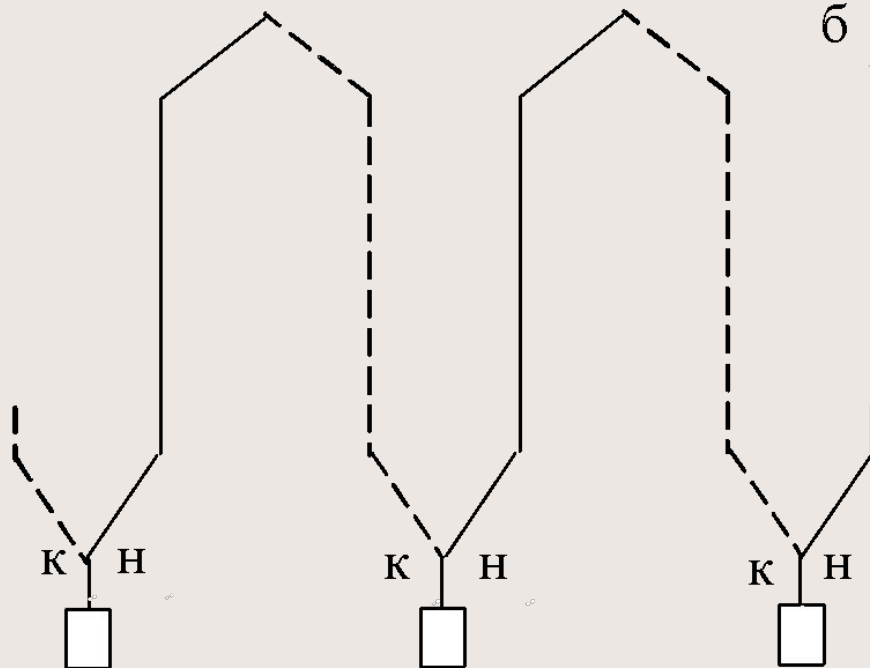


Рис. 1.16.





а



б

Рис. 1.17.

Секции обмотки соединяются друг с другом в последовательную цепь (рис.3.17) таким образом, что начало ( $n$ ) последующей секции присоединяется вместе с концом ( $k$ ) предыдущей секции к общей коллекторной пластине.

Поскольку каждая секция имеет 2 конца и к каждой коллекторной пластине присоединены также 2 конца секций, то общее число пластин коллектора  $K$  равно числу секций обмоток  $S$ :  
 $K=S$ .

Обычно в каждом слое паза располагаются рядом несколько ( $u_n = 2, 3, 4$ ) секционных сторон (на рис. 1.16  $u_n = 3$ ). При этом  $K = S = u_{II} Z$ .

В данном случае говорят, что в каждом реальном пазу имеется  $u_{II}$  *элементарных пазов*.

Когда  $u_{\text{II}} > 1$ , либо все секции имеют равную ширину (рис.3.18а), либо же часть секций имеет меньшую, а часть – большую ширину (рис.3.18б). В первом случае обмотка называется *равносекционной*, а во втором – *ступенчатой*. При ступенчатой обмотке условия токосъема с коллектора улучшаются, однако эта обмотка сложнее и дороже и поэтому применяется реже, притом только в МПТ большой мощности ( $P > 500$  кВт).

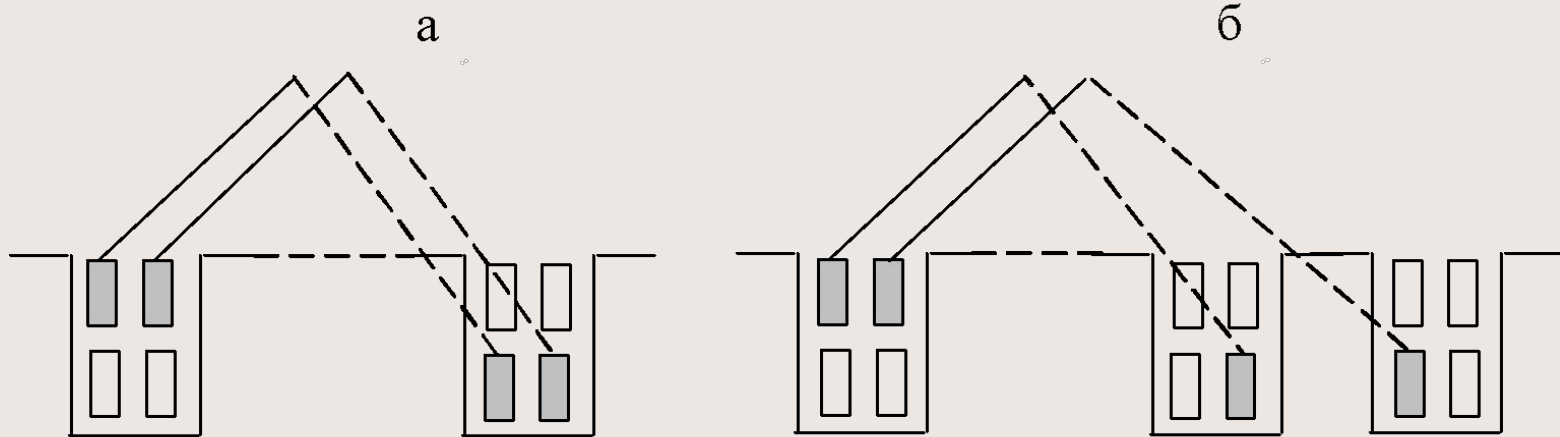


Рис. 3.18.

В равносекционных обмотках стороны секций, которые лежат рядом в общих пазах, объединяются в катушку (рис.1.19) и имеют общую изоляцию от стенок паза.

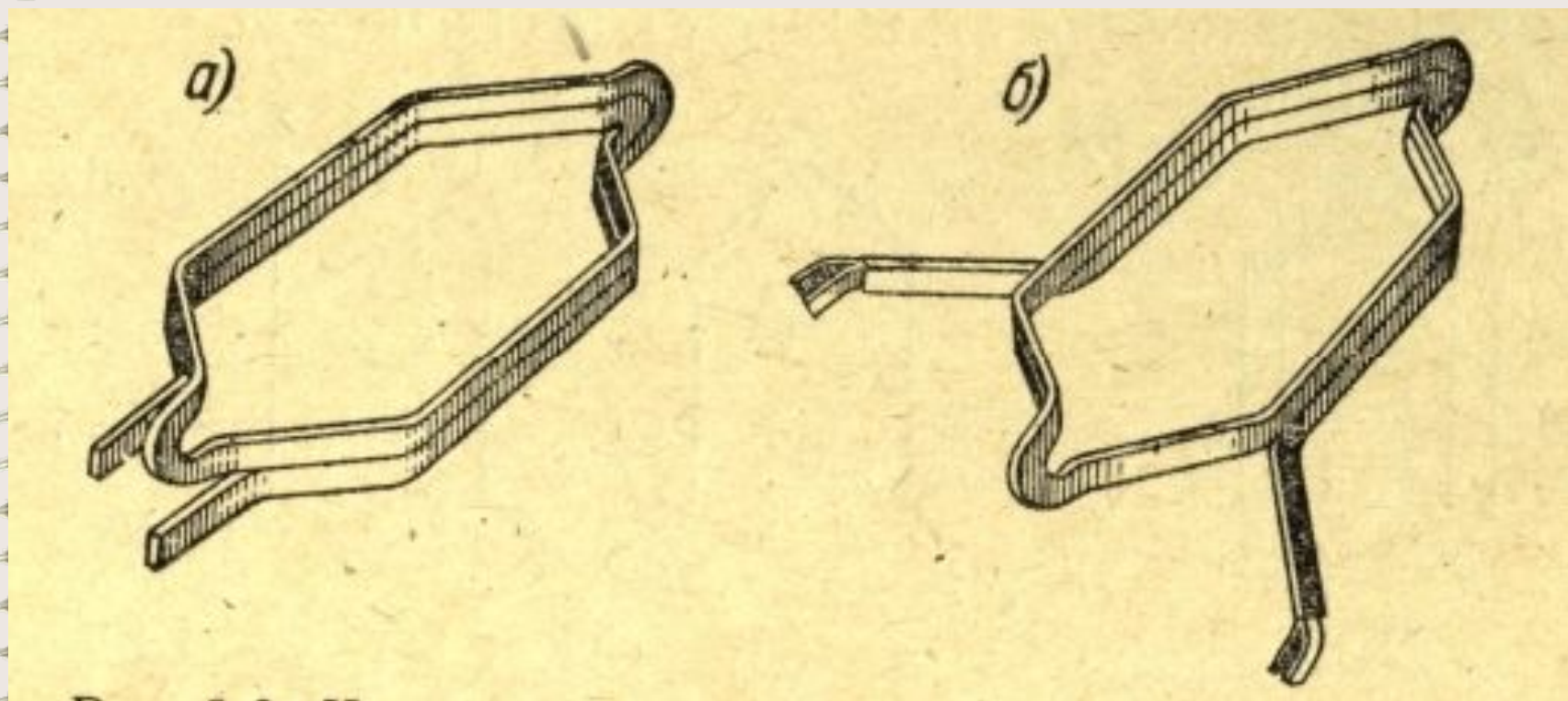


Рис.1.19

## 1.6.2. ЭДС секций

Будем считать, что ЭДС в проводниках обмотки будут направлены под северными полюсами вниз, а под южными – вверх.

Индуктируемая в секции ЭДС максимальна, если ширина секции (или первый частичный шаг обмотки  $y_1$ ) равна полюсному делению, т.к. при этом максимальное потокосцепление секции определяется полным потоком полюса в воздушном зазоре (рис.1.20). В данном случае при любом положении вращающегося якоря стороны секции находятся под разноименными полюсами и в них индуктируются ЭДС противоположных направлений, которые по контуру секции складываются.



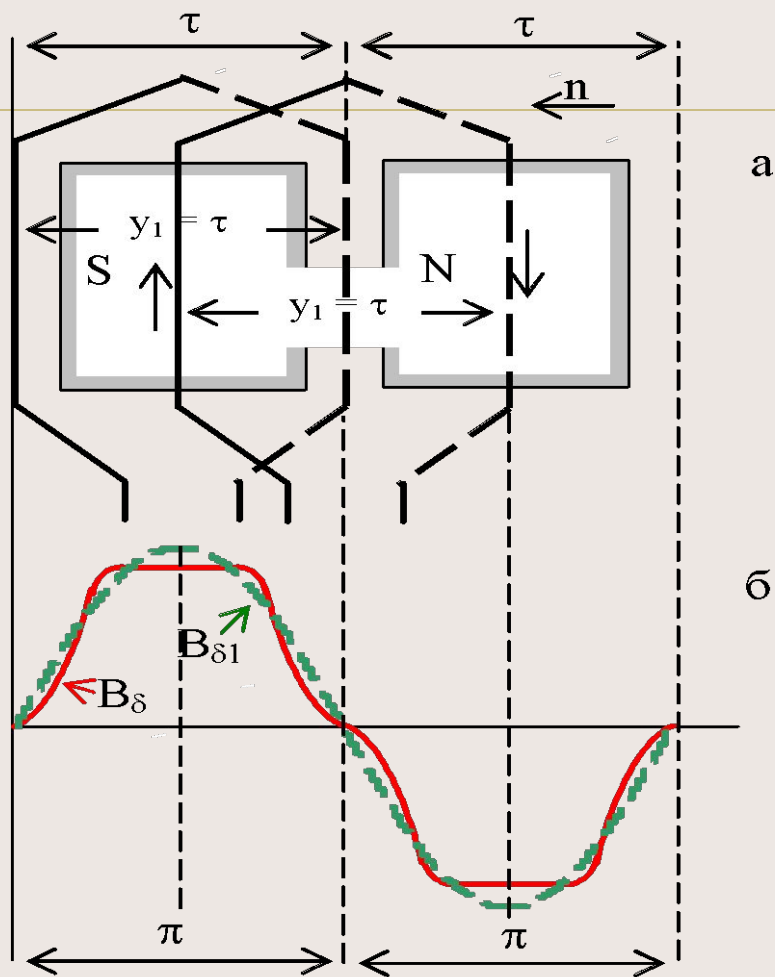


Рис. 1.20

Тем не менее, обычно обмотка выполняется с  $y_1$  несколько отличающимся от значения полюсного деления, т.к. при этом ЭДС существенным образом не изменяется, а условия токосъема с коллектора улучшаются. При  $y_1 = \tau$  шаг называется *полным* или *диаметральным*, при  $y_1 > \tau$  - *удлиненным*, а при  $y_1 < \tau$  - *укороченным*.

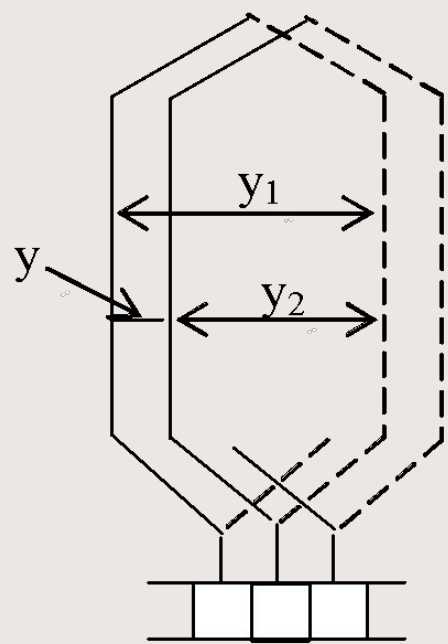
Шаг секции определяется по элементарным пазам:

$$y_1 = \frac{Z_3}{2 \cdot p} \pm \varepsilon$$

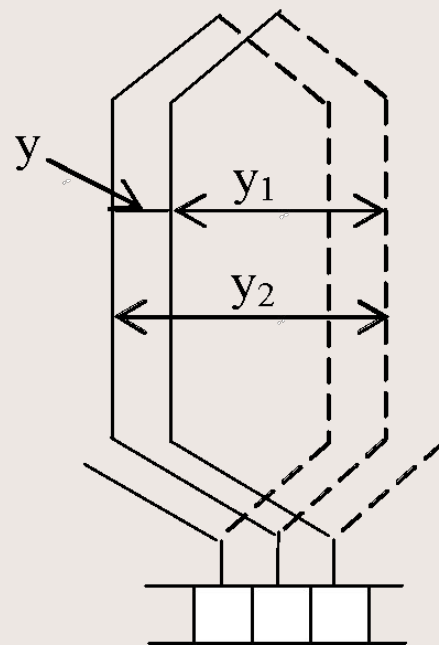
где  $\varepsilon$  - представляет собой дробь, при которой  $y_1$  будет целым числом. При  $\varepsilon=0$  шаг является *полным*.

## 1.6.3. Простая петлевая обмотка

На рис.1.21 представлены два возможных варианта последовательного соединения секций простой петлевой обмотки. *Первый частичный шаг  $y_1$*  определяет расстояние по поверхности якоря между начальной и конечной сторонами секции. *Второй частичный шаг  $y_2$*  определяет расстояние между конечной стороной секции и начальной стороной следующей за ней по схеме обмотки секции. *Результирующий шаг  $y$*  обмотки определяет расстояние между начальными сторонами данной и следующей за ней секцией.



а



б

Рис. 1.21.

Линия на поверхности якоря, проходящая в осевом направлении посередине между двумя соседними полюсами, называется *линией геометрической нейтрали* или *геометрической нейтралью*, т.к. вдоль этой линии магнитная индукция равна нулю  $B=0$ .

Характерной особенностью простой петлевой обмотки является:

$$2p = 2a$$

Если обмотка имеет полный шаг и щетки установлены на нейтрали, то ЭДС ветви будет наибольшей. Кроме того, при этом направления токов всех проводников, лежащих под одним полюсом, будут одинаковы, и поэтому развиваемый электромагнитный момент будет максимальным. Следовательно, такое устройство обмотки и такое расположение щеток является наиболее выгодными.

Расположение параллельных ветвей в пространстве относительно неподвижных полюсов определяется положением щеток и также неизменно. При вращении якоря секции переходят попеременно из одной ветви в другую, причем во время такого перехода секция замыкается накоротко щеткой и в ней происходит изменение направления тока, от значения  $+i_a$  до значения  $-i_a$ . Это явление называется *коммутацией секции*.



Явления в короткозамкнутой секции влияют на значения токов в щеточном контакте и на работу щеток. Совокупность явлений, связанных с замыканием секций накоротко щетками, переходом этих секций из одних параллельных ветвей обмотки в другие и передачей тока через скользящий контакт между коллектором и щеткой, называется *коммутацией машины*.

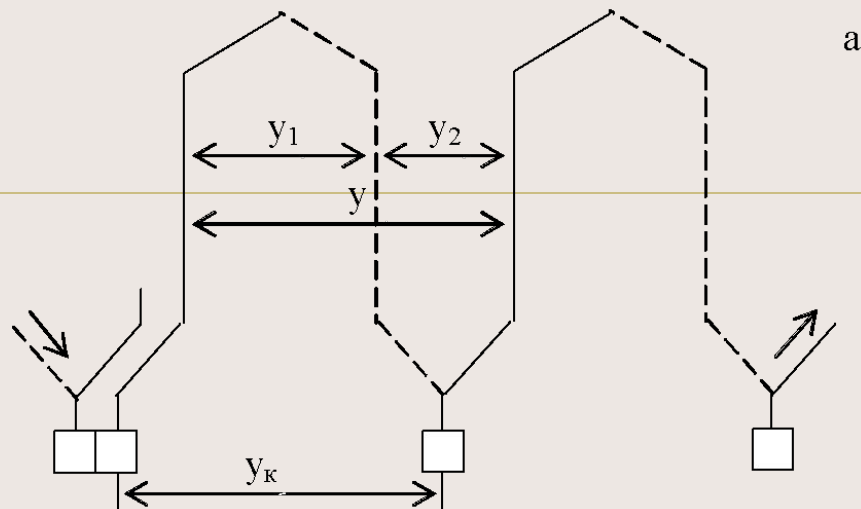
Иногда применяют сложную петлевую обмотку, являющуюся сочетанием нескольких ( $m = 2, 3, \dots$ ) простых петлевых обмоток. Число параллельных ветвей сложной петлевой обмотки

$$2a = 2pm$$

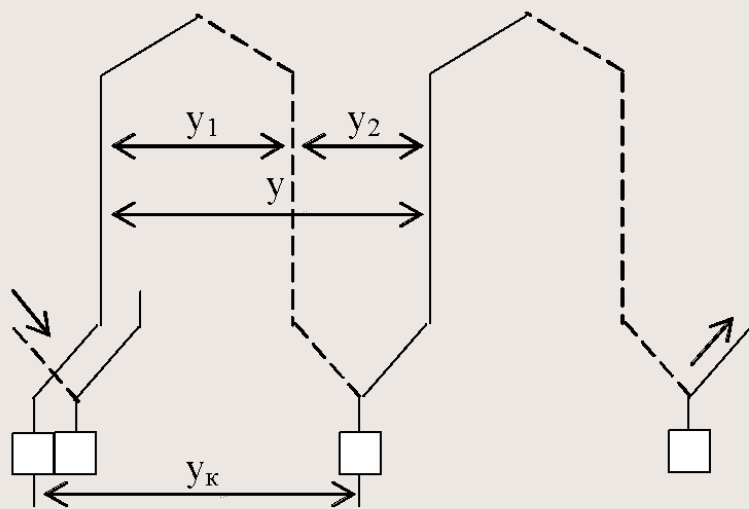
## 1.6.4. Простая волновая обмотка

Простая волновая обмотка изображена на рис.1.22. Обходя последовательно соединенные секции простой волновой обмотки, мы совершаем волнообразный обход якоря, причем каждый обход включает  $p$  секций и заканчивается на коллекторной пластине, которая находится слева или справа рядом с исходной. В первом случае (рис.1.23а) получается неперекрещенная обмотка, а во втором (рис.1.23б) – перекрещенная.

Простая волновая обмотка имеет число параллельных ветвей  $2a = 2$



а



б

Рис. 1.22.

## 1.6.5. Сложная волновая обмотка

Сложную волновую обмотку можно рассматривать как сочетание  $m$  простых волновых обмоток, которые включаются на параллельную работу с помощью щеток. Число параллельных ветвей такой обмотки соответственно в  $m$  раз больше числа ветвей простой волновой обмотки:  $2a = 2m$ .

## 1.6.6. Комбинированная обмотка

Комбинированная, или лягушечья, обмотка представляет собой сочетание петлевой и волновой обмоток, которые расположены в общих пазах, присоединяются к общему коллектору и работают параллельно.

Так как каждая из обмоток двухслойная, то в пазу располагаются четыре слоя обмотки. Каждая из обмоток рассчитывается на половину общего тока, а их ЭДС должны быть равны. Таким образом, каждая обмотка рассчитывается на половину мощности машины.