

В.В.СУХАНОВ
(СПбГТУ, кафедра “Электрические машины”)

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ НЕТРАДИЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

При создании электрических машин переменного тока нетрадиционного конструктивного исполнения, например, таких, как беспазовые или криогенные синхронные генераторы и двигатели, возникает настоятельная необходимость в расчете и анализе их магнитных полей. Однако, использование для этих целей закона Ома для магнитной цепи неприемлемо, так как немагнитный зазор у таких машин велик, а распределение магнитного поля в нем имеет крайне неоднородный характер. Поэтому, единственно верный подход к электромагнитным расчетам в рассматриваемом случае это полевая постановка задач с учетом реальной геометрии магнитной системы машины, действительного токораспределения ее обмоток, а также нелинейных свойств ферромагнитных сердечников, если таковые имеются.

Поскольку, основные электромагнитные процессы, связанные с электромеханическим преобразованием энергии в электрической машине, протекают в ее активной зоне, то первоначальные расчеты целесообразно ограничить плоскопараллельной постановкой задачи, рассматривая лишь поперечное сечение магнитной системы машины. При этом, обобщенную расчетную схему на примере двухполюсной неявнополюсной синхронной машины можно представить в пределах половины полюсного деления в виде, показанном на рис.1.

На этом рисунке оси d и q соответствуют продольной и поперечной осям синхронной машины. Внешняя граница области расчета с радиусом $R_{нк}$ отвечает наружному корпусу машины, причем в качестве допущения принимается, что магнитное поле не выходит за пределы этой границы. Области 2 и 6 на рис.1 представляют собой внутренний и наружный ферромагнитные сердечники, каждый из которых обладает своей, в общем случае, нелинейной зависимостью магнитной проницаемости $\mu(H)$ в соответствии с кривой намагничивания $B(H)$ используемого ферромагнитного материала. Остальные области расчетной схемы 1, 3-5 и 7 являются немагнитными, т.е. для них $\mu=\mu_0=const$. При этом, область 1 соответствует центральному отверстию внутреннего сердечника, которое может и отсутствовать. Области 3-5 в обычном понимании представляют собой зазор беспазовой машины. Область 7 характеризует наличие немагнитного пространства между корпусом машины и ее наружным сердечником.

Особо следует остановиться на токонесущей области 4 с расчетной плотностью тока j . В зависимости от своего радиального расположения по отношению к сердечникам она моделирует собой токораспределение обмоток внутреннего и наружного сердечников. В синхронной машине это есть либо

однофазная обмотка возбуждения постоянного тока (обмотка ротора или обмотка индуктора), либо многофазная обмотка переменного тока (обмотка статора или обмотка якоря). Кроме того, здесь, в соответствии с устоявшейся терминологией необходимо условиться в следующем. Если обмотка возбуждения находится на наружной поверхности внутреннего сердечника, а обмотка переменного тока - на внутренней поверхности наружного сердечника, то такой тип синхронной машины считается общепринятым или нормальным. При этом, внутренний сердечник есть не что иное как сердечник ротора, а наружный сердечник - сердечник статора. В противном случае, когда обмотка возбуждения располагается на внутренней поверхности наружного сердечника, а обмотка переменного тока на наружной поверхности внутреннего сердечника, то такое исполнение магнитной системы соответствует обращенной синхронной машине. В данном варианте конструкции наружный сердечник оказывается сердечником индуктора, а внутренний сердечник - сердечником якоря. Наконец, нельзя не отметить также и тот факт, что как в нормальной, так и в обращенной синхронной машине наружный сердечник неподвижен в пространстве, а вращающимся элементом является внутренний сердечник. В связи с этим, если в нормальной синхронной машине магнитные поля обмоток ротора и статора вращаются в пространстве с синхронной скоростью, то в обращенной синхронной машине магнитные поля обмоток индуктора и якоря неподвижны в пространстве.

В установившихся режимах работы полевые задачи расчета магнитных полей в обоих типах синхронных машин могут быть сведены к задачам магнитостатики. Данное утверждение очевидно и не вызывает сомнений в отношении обращенной синхронной машины, поскольку, как было отмечено выше, магнитные поля ее обмоток неподвижны в пространстве. Поэтому, уравнения поля в данном случае записываются и решаются в неподвижной системе координат.

Магнитные поля синхронной машины нормального типа являются вращающимися и для того, чтобы воспользоваться уравнениями магнитостатики, достаточно ввести систему координат, которая вращается в пространстве с той же синхронной скоростью, что и скорость полей обмоток ротора и статора.

Таким образом, рассмотренная выше обобщенная расчетная схема в зависимости от взаимного расположения обмоток постоянного и переменного тока дает первую пару (группу) вариантов конструктивного исполнения неявнополюсной синхронной машины. От машин традиционной конструкции эти варианты отличаются лишь тем, что у обоих сердечников отсутствуют зубцовые зоны и, как следствие этого, они имеют увеличенные зазоры.

На основе представленной схемы можно получить еще две новые пары (группы) вариантов конструкции машин. Так, вторая пара (группа) вариантов соответствует случаю, когда в магнитной системе машины отсутствует один из ферромагнитных сердечников. При этом, если конфигурация магнитной

системы такова, что в ней отсутствует внутренний ферромагнитный сердечник и обмотка постоянного тока находится внутри обмотки переменного тока (нормальной тип синхронной машины), то таким образом получается вариант конструкции с немагнитным ротором и ферромагнитным статором. Наоборот, если в магнитной системе отсутствует наружный ферромагнитный сердечник и обмотка постоянного тока находится снаружи обмотки переменного тока (обращенный тип синхронной машины), то в данном случае будем иметь вариант конструкции с немагнитным индуктором и ферромагнитным якорем. Следует отметить, что в этой группе вариантов понятие зазора в электрической машине, как таковое, отсутствует.

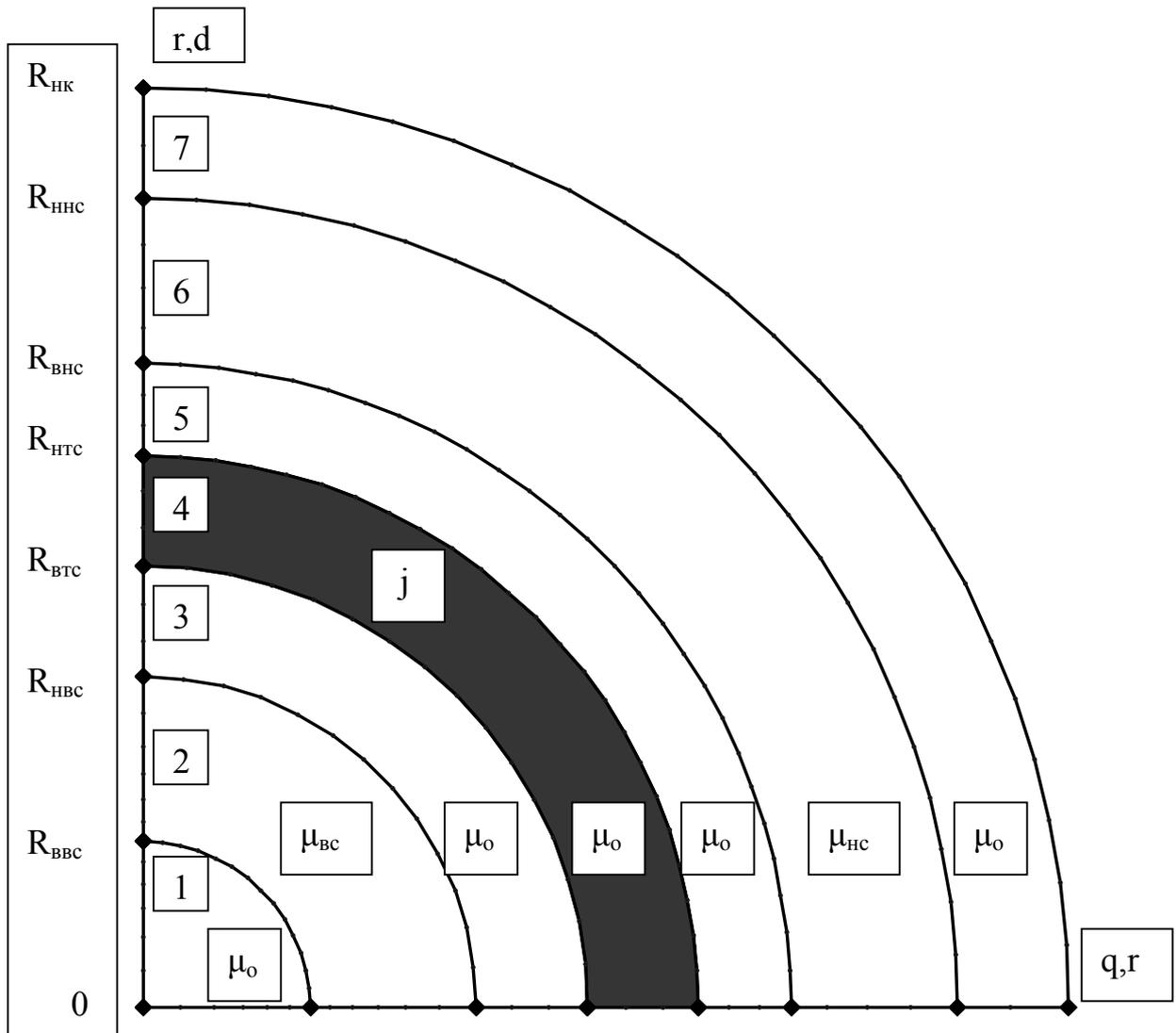
Третья пара (группа) вариантов конструкции синхронной машины получается из обобщенной расчетной схемы тогда, когда в ней отсутствуют оба ферромагнитных сердечника. Это варианты конструктивного исполнения полностью немагнитных неявнополюсных синхронных машин нормального и обращенного типа. Здесь, также, как и в вариантах второй группы, понятие зазора лишено смысла.

Таким образом, расчет магнитного поля надлежит вести в шести принципиально разных вариантах нетрадиционного конструктивного исполнения магнитной системы неявнополюсной синхронной машины. При этом, в каждом варианте конструкции необходимо определить, как магнитное поле обмотки возбуждения постоянного тока (поле обмотки ротора или индуктора), так и магнитное поле обмотки переменного тока (поле обмотки статора или якоря).

Рассмотренные выше варианты конструкции машин и соответствующие им варианты расчета поля приведены в таблице 1. Там же даны условные обозначения всех вариантов, которые расшифровываются следующим образом:

- НСМ** - неявнополюсная синхронная машина
- НТ** - нормальный тип синхронной машины
- ОТ** - обращенный тип синхронной машины
- БФРС** - беспазовый ферромагнитный ротор и статор
- БФИЯ** - беспазовый ферромагнитный индуктор и якорь
- НР** - немагнитный ротор
- БФС** - беспазовый ферромагнитный статор
- НИ** - немагнитный индуктор
- БФЯ** - беспазовый ферромагнитный якорь
- НРС** - немагнитный ротор и статор
- НИЯ** - немагнитный индуктор и якорь
- МПОР** - магнитное поле обмотки ротора
- МПОС** - магнитное поле обмотки статора
- МПОИ** - магнитное поле обмотки индуктора
- МПОЯ** - магнитное поле обмотки якоря
- I_f** - ток в обмотке возбуждения постоянного тока
- I_1** – фазный ток многофазной обмотки переменного тока

Обобщенная расчетная схема магнитной системы в поперечном сечении
беспазовой неявнополюсной синхронной машины



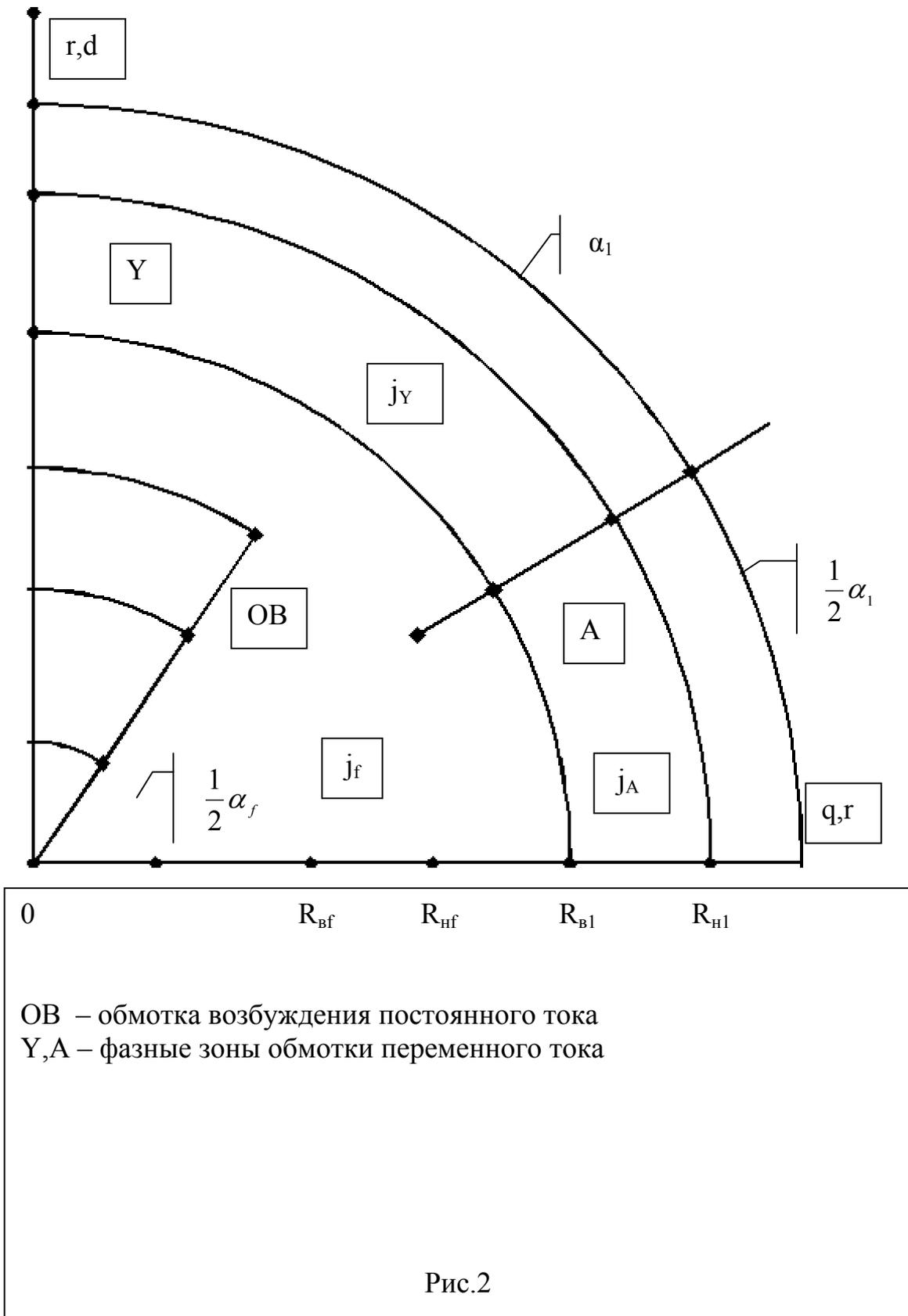
$R_{ввс}$ - внутренний радиус внутреннего ферромагнитного сердечника
 $R_{нвс}$ - наружный радиус внутреннего ферромагнитного сердечника
 $R_{втс}$ - внутренний радиус токового слоя
 $R_{нтс}$ - наружный радиус токового слоя
 $R_{внс}$ - внутренний радиус наружного ферромагнитного сердечника
 $R_{ннс}$ - наружный радиус наружного ферромагнитного сердечника
 $R_{нк}$ - радиус наружного корпуса
 $\mu_{вс}$ - магнитная проницаемость внутреннего сердечника
 $\mu_{нс}$ - магнитная проницаемость наружного сердечника

Рис.1

Таблица 1

Полное название синхронной машины	Условные обозначения			
	Синхронной машины	При расчете магнитного поля обмотки постоянного и переменного тока		
1. Неявнополюсная синхронная машина нормального типа с беспазовым ферромагнитным ротором и статором	1.НСМ-НТ-БФРС	МПОР	$I_f \neq 0$	$I_1 = 0$
		МПОС	$I_f = 0$	$I_1 \neq 0$
2. Неявнополюсная синхронная машина обращенного типа с беспазовым ферромагнитным индуктором и якорем	2.НСМ-ОТ-БФИЯ	МПОИ	$I_f \neq 0$	$I_1 = 0$
		МПОЯ	$I_f = 0$	$I_1 \neq 0$
3. Неявнополюсная синхронная машина нормального типа с немагнитным ротором и беспазовым ферромагнитным статором	3.НСМ-НТ-НР-БФС	МПОР	$I_f \neq 0$	$I_1 = 0$
		МПОС	$I_f = 0$	$I_1 \neq 0$
4. Неявнополюсная синхронная машина обращенного типа с немагнитным индуктором и беспазовым ферромагнитным якорем	4.НСМ-ОТ-НИ-БФЯ	МПОИ	$I_f \neq 0$	$I_1 = 0$
		МПОЯ	$I_f = 0$	$I_1 \neq 0$
5. Неявнополюсная синхронная машина нормального типа с немагнитным ротором и статором	5.НСМ-НТ-НРС	МПОР	$I_f \neq 0$	$I_1 = 0$
		МПОС	$I_f = 0$	$I_1 \neq 0$
6. Неявнополюсная синхронная машина обращенного типа с немагнитным индуктором и якорем	6.НСМ-ОТ-НИЯ	МПОИ	$I_f \neq 0$	$I_1 = 0$
		МПОЯ	$I_f = 0$	$I_1 \neq 0$

К расчету токораспределения обмоток



При плоскопараллельной постановке полевой задачи магнитное поле в плоскости поперечного сечения магнитной системы машины двухкомпонентно, т.е. вектор магнитной индукции \mathbf{B} имеет две составляющие B_x, B_y в прямоугольной системе координат и B_r, B_θ в полярных координатах. Расчет такого поля целесообразно вести через векторный магнитный потенциал A , который однокомпонентен и имеет единственную осевую составляющую $A_z = zA_z$, где z – орт оси z , а A_z проекция вектора A_z на эту ось. При этом связь между \mathbf{B} и A вводится соотношением $\mathbf{B} = \text{rot } A$, а проекции составляющих вектора \mathbf{B} на оси прямоугольных и полярных координат соответственно равны:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}, \quad B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta}, \quad B_\theta = -\frac{\partial A_z}{\partial r} \quad (1)$$

В магнитоэстатическом поле векторный магнитный потенциал удовлетворяет уравнению Пуассона. Для линейной и анизотропной среды и в проекции на ось z прямоугольной системы координат оно имеет следующий обобщенный вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -j_z, \quad (2)$$

где μ_x, μ_y – компоненты тензора магнитной проницаемости μ , j_z – осевая проекция вектора плотности тока.

Расчетная область на рис.1 содержит три типа различных подобластей, в каждой из которых уравнение (2) приобретает свою форму записи. Так, в областях немагнитного пространства 1, 3, 5 и 7 оно переписывается, как

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

В области ферромагнитных сред 2 и 6 уравнение (2) будет иметь вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0, \quad (4)$$

Наконец, в области токонесущего слоя 4 исходное уравнение (2) примет следующую форму:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu_0 j \quad (5)$$

В уравнениях (3)-(5) подстрочный индекс u векторного потенциала и плотности тока для упрощения записи опущен.

Для решения системы (3)-(5) в многосвязной области необходимо прежде всего задать источники поля, каковыми в данной задаче являются плотности токов в обмотке постоянного или переменного тока.

Определим сначала плотность тока возбуждения $j = j_f$ в обмотке ротора или индуктора. В неявнополюсных синхронных машинах эти обмотки выполняются в виде обмоток седлообразной формы. Расчетная схема такой обмотки на половине полюсного деления двухполюсной машины показана на рис.2.

При рассмотрении обмотки ротора или индуктора в соответствии с обобщенной расчетной схемой (см. рис.1) необходимо принять, что

$$R_{\text{втс}}=R_{\text{вф}}, R_{\text{нтс}}=R_{\text{нф}},$$

Расчетное значение плотности тока возбуждения j_f можно определить, как

$$j_f = \frac{F_f}{S_f}, \quad (6)$$

где F_f – намагничивающая сила обмотки возбуждения на один полюс; S_f – площадь сечения обмотки возбуждения, занимаемая ее витками на половине полюсного деления.

Значения F_f и S_f соответственно равны:

$$F_f = I_f w_f, \quad S_f = \frac{\alpha_f}{2} R_{fcp} \Delta R_f, \quad (7)$$

где I_f – ток обмотки возбуждения; w_f – число витков обмотки возбуждения на один полюс; R_{fcp} – средний радиус обмотки возбуждения; ΔR_f – радиальная толщина обмотки возбуждения; α_f – центральный геометрический угол, соответствующий обмотанной части полюсного деления ρ_f .

Поскольку

$$\alpha_f = \frac{\gamma_f \pi}{p}, \quad R_{fcp} = \frac{R_{\text{эф}} + R_{\text{нф}}}{2}, \quad \Delta R_f = R_{\text{нф}} - R_{\text{эф}}, \quad (8)$$

то окончательное выражение для плотности тока обмотки возбуждения с учетом (6)-(8) примет следующий вид:

$$j_f = \frac{4pI_f w_f}{\gamma_f \pi (R_{\text{нф}}^2 - R_{\text{эф}}^2)}, \quad (9)$$

где p – число пар полюсов синхронной машины; γ_f – отношение обмотанной части полюсного деления ρ_f к полюсному делению τ_f , которые определяются на уровне среднего радиуса обмотки возбуждения.

Рассмотрим теперь определение плотности тока в токонесящей области 4 (см. рис.1), когда она моделирует токораспределение обмотки переменного тока (обмотки статора или якоря). При этом следует принять, что

$$R_{\text{втс}}=R_{\text{в1}}, R_{\text{нтс}}=R_{\text{н1}}$$

Обычно в электрических машинах переменного тока многофазные обмотки выполняются в виде $2m$ -зонных двухслойных петлевых или волновых обмоток с укороченным шагом и с углом фазной зоны в $\alpha_s = \pi/m$ электрических градусов, где m -число фаз. Для определенности и упрощения постановки задачи будем считать, что рассматривается трехфазная шестизонная двухслойная петлевая обмотка с диаметральной шагом. В противном случае, при укороченном шаге, токораспределение слоев смещаются друг относительно друга на величину укорочения шага и тогда, в силу несимметрии, расчет поля такой обмотки следует вести как минимум на двойном полюсном делении машины, что естественно увеличивает область расчета в четыре раза. С учетом изложенного расчетная схема двухполюсной обмотки переменного тока также

представлена на рис.2 в пределах половины полюсного деления машины. Взаимное расположение фазных зон Y и A соответствует общепринятому порядку их чередования в многополюсной машине в последовательности $A-Z-B-X-C-\underline{Y-A}-Z-B-X-$ и так далее. Фаза A , занимающая на рис.3 половину фазной зоны считается главной, так как ее магнитная ось совмещена с продольной осью машины. При этом, результирующее магнитное поле обмотки переменного тока в момент времени, когда токи в фазной зоне A достигают максимального амплитудного значения, также будет ориентировано вдоль оси d . В этот же момент времени, токи в фазной зоне Y , имея одинаковое направление с токами фазной зоны A , по величине будут в два раза меньше. Поскольку, площадь поперечного сечения всех фазных зон одинакова, то расчетное значение плотности тока j_Y в фазной зоне Y также будет в два раза меньше, чем расчетное значение плотности тока j_A в фазной зоне A , т.е.:

$$j_Y = \frac{1}{2} j_A \quad (10)$$

Таким образом, токонесущая область 4, моделирующая токопояс распределения многофазной обмотки переменного тока, подразделяется на две подобласти с различными значениями плотности тока j_Y и j_A , которые связаны между собой соотношением (10).

Поскольку, геометрическая конфигурация фазной зоны главной фазы A подобна обмотке возбуждения неявнополюсного типа, то для расчета плотности тока j_A можно исходить из тех же соображений, что и при расчете плотности тока j_f . Поэтому, по аналогии с (6)-(8), будем иметь:

$$j_A = \frac{F_\phi}{S_\phi}, \quad F_\phi = \frac{1}{2} w_\phi I_{m1} = \frac{\sqrt{2}}{2} w_\phi I_1, \quad S_\phi = \frac{1}{2} \alpha_1 R_{1cp} \Delta R_1, \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{pm}, \quad R_{1cp} = \frac{R_{\sigma 1} + R_{n1}}{2}, \quad \Delta R_1 = R_{n1} - R_{\sigma 1},$$

где F_ϕ – намагничивающая сила фазы на один полюс; S_ϕ – площадь сечения половины фазной зоны; w_ϕ – число витков в фазе; I_{m1} и I_1 – амплитуда и действующее значение фазного тока прямой последовательности; α_1 – центральный геометрический угол фазной зоны; R_{1cp} – средний радиус обмотки переменного тока; ΔR_1 – радиальная толщина обмотки.

С учетом (11) выражение для плотности тока j_A примет следующий вид:

$$j_A = \frac{2\sqrt{2} pm w_\phi I_1}{\pi (R_{n1}^2 - R_{\sigma 1}^2)} \quad (12)$$

В зависимости от типа обмотки (катушечная или стержневая) число витков в фазе соответственно равно:

$$w_\phi = \frac{2pqw_k}{a} = \frac{pqS_\Pi}{a}, \quad (13)$$

где q – число условных пазов на полюс и фазу; w_k – число витков в катушке при катушечной обмотке; a – число параллельных ветвей обмотки; S_{II} – число эффективных проводников (стержней) в пазу при стержневой обмотке.

В завершение формулировки краевой задачи на внешних границах исследуемой области расчета необходимо задать граничные условия для векторного потенциала A_z , отвечающие физическим условиям существования магнитного поля на этих границах. Область на рис.1 содержит три типа границ. Это оси d, q и граница, соответствующая наружному корпусу машины. Ось d является осью симметрии магнитного поля и значение векторного потенциала на этой границе согласно (1) может быть принято равным нулю, т.е.:

$$A_{zd}=0, \quad (14)$$

что соответствует нулевому граничному условию первого рода (нулевое условие Дирихле).

Ось q является осью антисимметрии магнитного поля. Поэтому, на этой границе в соответствии с (1) нормальная производная от векторного потенциала должна равняться нулю, т.е.:

$$\frac{\partial A_{zq}}{\partial n} = 0, \quad (15)$$

что соответствует нулевому граничному условию второго рода (нулевое условие Неймана).

На внешней границе при $r=R_{нк}$ по условиям задачи принято, что магнитное поле не выходит за пределы этой границы, что равносильно условию $B_{rнк}=0$. Для векторного потенциала A_z , согласно (1), оно означает, что на данной границе

$$A_{zнк}=0 \quad (16)$$

На внутренних границах разнородных сред поведение векторного потенциала должно подчиняться условиям непрерывности нормальных составляющих индукции и касательных составляющих напряженности магнитного поля.

Полевая постановка магнитостатической задачи в формулировке (3)-(5), (9), (10), (12) и (14)-(16) может быть успешно решена лишь путем численных методов расчета, среди которых наиболее универсальным на данный момент является метод конечных элементов.

Наилучшим образом для этих целей подходит интерактивная система моделирования двумерных краевых задач методом конечных элементов на основе программного комплекса ELCUT производственного кооператива ГОР (студенческая версия ELCUT 4.1 и профессиональная версия ELCUT 4.2 для Windows 95/98 NT).

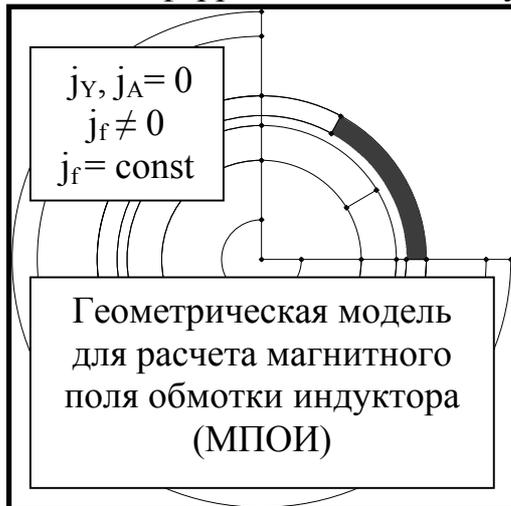
Ниже, на страницах 11 и 12, в соответствии с таблицей 1 приведены все варианты по геометрической конфигурации расчетных схем, которые построены с помощью блока геометрических моделей пакета ELCUT. Затемненные зоны в области токораспределения обмоток показывают, в какой

из них необходимо задать соответствующую плотность тока, чтобы сформировать задачу расчета магнитного поля этой обмотки.

1. Неявнополюсная синхронная машина нормального типа с беспазовым ферромагнитным ротором и статором (Вар.1.НСМ-НТ-БФРС)



2. Неявнополюсная синхронная машина обращенного типа с беспазовым ферромагнитным индуктором и якорем (Вар.2.НСМ-ОТ-БФИЯ)



3. Неявнополюсная синхронная машина нормального типа с немагнитным ротором и беспазовым ферромагнитным статором (Вар.3.НСМ-НТ-НР-БФС)



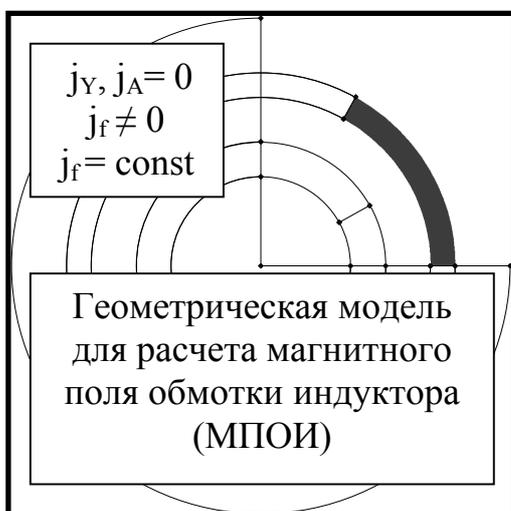
4. Неявнополюсная синхронная машина обращенного типа с немагнитным индуктором и беспазовым ферромагнитным якорем (Вар.4.НСМ-ОТ-НИ-БФЯ)



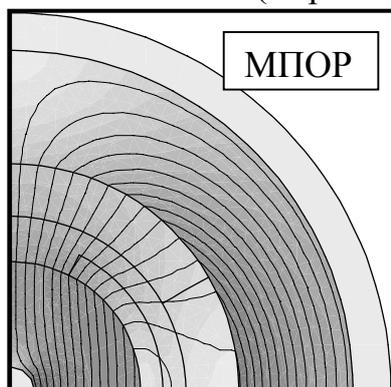
5. Неявнополюсная синхронная машина нормального типа с немагнитным ротором и статором (Вар.5.НСМ-НТ-НРС)



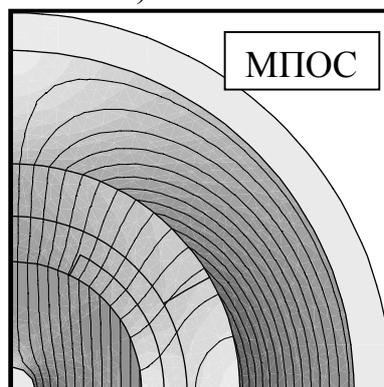
6. Неявнополюсная синхронная машина обращенного типа с немагнитным индуктором и якорем (Вар.6.НСМ-ОТ-НИЯ)



1. Магнитные поля неявнополюсной синхронной машины нормального типа с беспазовым ферромагнитным ротором и статором
(Вариант 1.НСМ-НТ-БФРС)

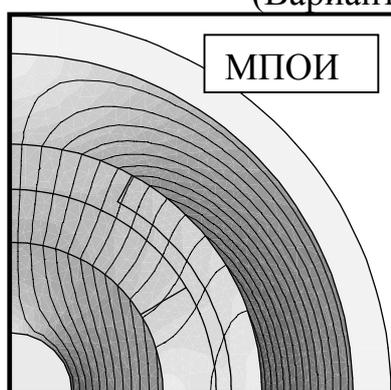


Магнитное поле обмотки ротора

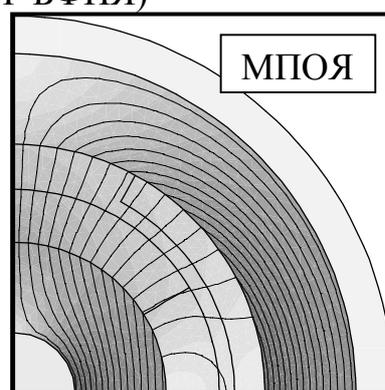


Магнитное поле обмотки статора

2. Магнитные поля неявнополюсной синхронной машины обращенного типа с беспазовым ферромагнитным индуктором и якорем
(Вариант 2.НСМ-ОТ-БФИЯ)

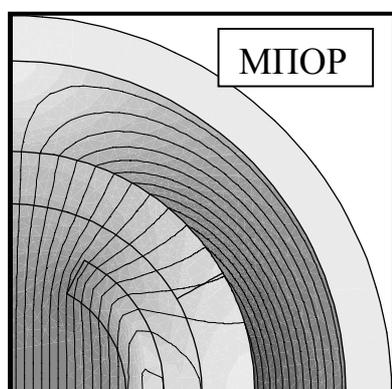


Магнитное поле обмотки индуктора

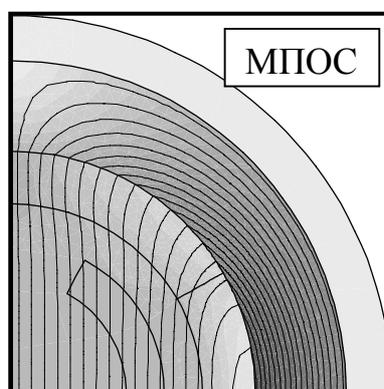


Магнитное поле обмотки якоря

3. Магнитные поля неявнополюсной синхронной машины нормального типа с немагнитным ротором и беспазовым ферромагнитным статором
(Вариант 3.НСМ-НТ-НР-БФС)

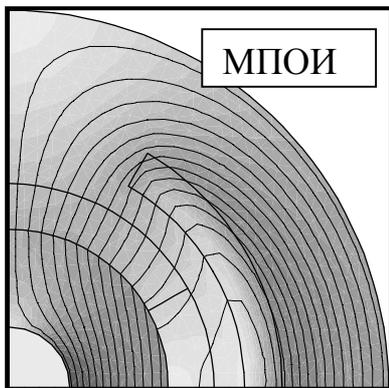


Магнитное поле обмотки ротора

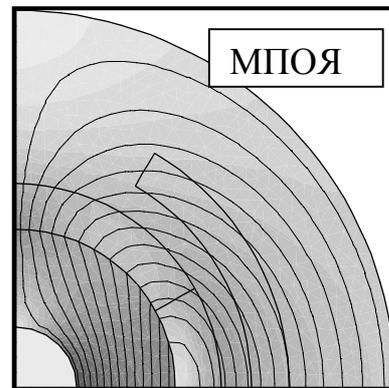


Магнитное поле обмотки статора

4. Магнитные поля неявнополюсной синхронной машины обращенного типа с немагнитным индуктором и беспазовым ферромагнитным якорем (Вариант 4.НСМ-ОТ-НИ-БФЯ)

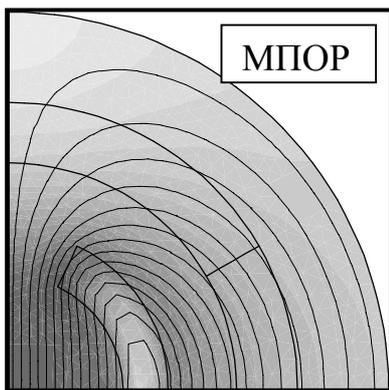


Магнитное поле обмотки индуктора

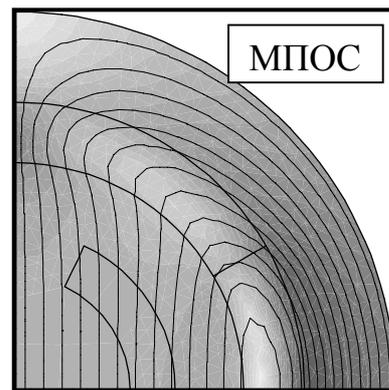


Магнитное поле обмотки якоря

5. Магнитные поля неявнополюсной синхронной машины нормального типа с немагнитным ротором и статором (Вариант 5.НСМ-НТ-НРС)

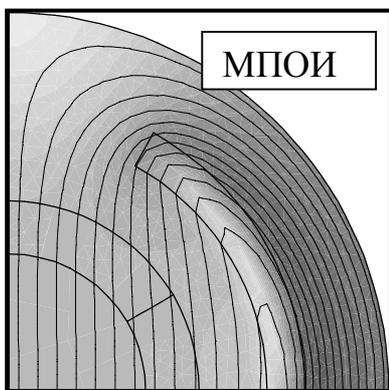


Магнитное поле обмотки ротора

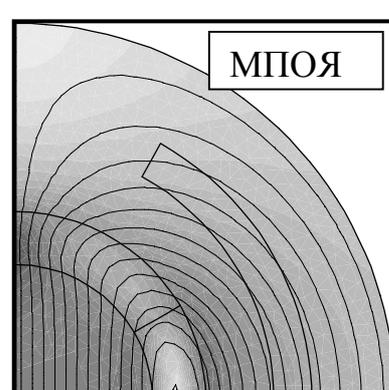


Магнитное поле обмотки статора

6. Магнитные поля неявнополюсной синхронной машины обращенного типа с немагнитным индуктором и якорем (Вариант 6.НСМ-ОТ-НИЯ)



Магнитное поле обмотки индуктора



Магнитное поле обмотки якоря

На страницах 13 и 14, в качестве иллюстрации, приведены типовые решения вышерассмотренных магнитостатических задач в виде картин магнитного поля для всех вариантов расчетных схем. Картины поля рассчитаны и построены на основе программного комплекса ELCUT-4.2 (профессиональная версия).

Все задачи решались в линейной постановке, а ферромагнитные среды, представляемые внутренним или наружным сердечником (ротора, статора или индуктора, якоря) принимались изотропными с абсолютной магнитной проницаемостью $\mu = 100\mu_0$. Расчетная величина плотности тока j_f в области обмотки возбуждения постоянного тока (обмотка ротора или индуктора) и плотности тока j_A в области фазной зоны главной фазы А обмотки переменного тока (обмотка статора или якоря) принималась такой, чтобы получить реальные для электрических машин значения индукции магнитного поля (B_r и B_θ), как в активной зоне (область немагнитного зазора), так и в спинках ферромагнитных сердечников. Всю остальную конкретную информацию в терминах комплекса программ ELCUT, касающуюся вида и постановки задачи, радиальной и тангенциальной геометрии моделей, физических свойств всех подобластей и граничных условий на внешних границах расчетных схем, можно найти в рабочих файлах пакета с соответствующим расширением, которые прилагаются к настоящему описанию в соответствии с обозначениями таблицы 1.

В заключение изложенного следует отметить, что представленный материал можно рассматривать как методические указания к курсовому проекту по спецкурсу “Электромагнитные расчеты в электрических машинах”, который читается автором студентам четвертого курса кафедры “Электрические машины” СПГУ. В данном спецкурсе аналогичные задачи, но при большем количестве допущений, решаются аналитически. В частности, при постановке рассмотренных задач принимается, что магнитная проницаемость ферромагнитных сердечников бесконечно велика, а токораспределение обмоток представляется бесконечно тонкими токовыми слоями, в которых учитывается лишь первая гармоника линейной плотности тока. Использование универсального программного комплекса ELCUT позволяет оценить качественно и количественно погрешность аналитических методов исследования, что полезно не только в инженерной, но и в учебной практике расчетов.