

Вентильные двигатели для привода подач высокоточных металлорежущих станков

В.М.Гандшу

В современных высокоточных металлорежущих станках и автоматизированных обрабатывающих центрах устанавливаются два или более электроприводов. Один из них, именуемый главным, предназначен для вращения детали относительно режущего инструмента (токарные операции) или наоборот (фрезерные или сверлильные операции). Остальные приводы, именуемые приводами подач, выполняют функцию перемещения инструмента. Главный привод обладает большой мощностью, т.к. именно он преодолевает силы сопротивления резанию, приводы же подач по мощности на порядок и более могут уступать главному, но именно они обеспечивают точность и чистоту обработки детали и одновременно производительность оборудования, поскольку от них зависит как точность взаимного позиционирования инструмента и обрабатываемой детали, так и быстрота перемещения инструмента при смене операций. В связи с этим к двигателям, составляющим основу приводов подач, предъявляются высокие требования в плане широты диапазона регулирования частоты вращения, линейности регулировочных характеристик, быстродействия, способности выдерживать высокие перегрузки по току и моменту. Аналогичные требования предъявляются и к двигателям, устанавливаемым в приводах для промышленных роботов.

Необходимость сочетания всех указанных требований привели к тому, что до 70-х гг. монополистами в этой области были коллекторные двигатели постоянного тока. Они обладали всеми необходимыми свойствами, однако, в то же время, и всеми недостатками, привносимыми щеточно-коллекторным узлом: низкая надежность, необходимость периодического ухода, высокий уровень помех, вызванных искрением на коллекторе, малый срок службы. Выходом из создавшегося положения был переход в наиболее развитых странах на вентильные двигатели, который стал возможен в связи с прогрессом в области электроники (особенно силовой) и в области создания постоянных магнитов с высокими значениями остаточной индукции и коэрцитивной силы. Обладая

практически теми же характеристиками, что и двигатели постоянного тока, они полностью лишены всех недостатков, обусловленных вращающимися контактами.

Одной из многочисленных разработок в области вентильных двигателей для приводов станков являются разработанные и серийно выпускаемые двигатели типа DVU2M. Индуктор всех этих двигателей построен на базе ферритов стронция 28СА250. Основные параметры ряда двигателей данной серии, предназначенных для работы от трехфазной сети 50 Гц с линейным напряжением 380 В в диапазоне частот вращения от 0.1 до 2000 об/мин (1:20000), приведены ниже в таблице [1]. В настоящее время ведется дальнейшая работа над совершенствованием этих двигателей. В новой модификации, получившей наименование DVU3M, в индукторе использованы редкоземельные высококоэрцитивные магниты Nd-Fe-B с гарантированными значениями остаточной индукции $B_r=1.05$ Тл и коэрцитивной силы по индукции $H_{cb}=750$ кА/м.

| Параметры | Величины для типоразмеров серии двигателей: | | | | | |
|---------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | M165S | M165M | M165L | M215S | M215M | M215L |
| Диаметр фланца, мм | 130 | 130 | 130 | 180 | 180 | 180 |
| Длина корпуса, мм | 390 | 442 | 491 | 446 | 516 | 589 |
| Длительный момент на упоре, Н·м | 7 | 10 | 13 | 17 | 23 | 35 |
| Ток при работе на упор, А | 4.5 | 5.4 | 7.0 | 9.6 | 13.4 | 21.7 |
| Масса, кг | 21.7 | 26.9 | 32.6 | 42.9 | 55.1 | 66.8 |

В данной работе будет рассмотрен расчет этих двигателей с помощью пакета ELCUT [2] на примере двигателя DVU3M215. Применение конечно-элементного метода расчета было обусловлено тремя обстоятельствами:

- Высококоэрцитивные магниты сравнительно дороги, и поэтому они в рассматриваемых двигателях имеют вид тонких сегментов, толщина которых существенно (больше, чем в 3 раза) меняется от середины к краю.
- При работе на упор н.с. реакции якоря сопоставима с н.с. магнитов.
- Необходимость получения широкого диапазона регулирования частоты вращения, измеряемая десятками тысяч, требует почти полного исключения зубцовых моментов, в связи с чем здесь была использована дробная обмотка (27 пазов, 6 полюсов). При таком сочетании чисел пазов и полюсов традиционные методы расчета магнитной цепи оказываются неэффективными,

т.к. в данном случае магнитная цепь не распадается на $2p$ (число полюсов) идентичных контуров.

Описание магнитостатической задачи для решения её с помощью пакета ELCUT приведены в прилагаемых файлах. Это файл общего описания проблемы *3m215n01.pbm*, файл геометрии модели *3m215n01.mod*, файл физических параметров специфических для данной задачи *Ventmot2.dms* и файл-библиотека физических параметров *Datalib.dms*, в котором собраны магнитные свойства практически всех наиболее широко употребляемых электротехнических материалов. Дополнительно укажем, что длина пакета составляет 150 мм.

Здесь представляет интерес остановиться на способе задания магнитов в модели. Вообще ELCUT представляет две возможности задать магниты:

- В виде изотропного блока с относительной магнитной проницаемостью, определяемой из соотношения $B_r/\mu_0 H_{cb}$, и края этого блока с линейной плотностью тока, равной H_{cb} (со знаком плюс или минус).
- В виде анизотропного блока с вышеуказанной магнитной проницаемостью и заданным направлением намагниченности с той же величиной H_{cb} .

Оба эти метода имеют свои рациональные области применения. Первый применим тогда, когда поперечное сечение магнита в плоскости чертежа имеет форму близкую к прямоугольнику. В этом случае с помощью соответствующего задания плотности тока легко можно задать магнит при любом направлении его ориентации. Образно говоря, магнит представляется как некая катушка с сердечником с относительной магнитной проницаемостью в пределах 1.1-1.3 и обмоткой возбуждения, «размазанной» на боковой (относительно направления намагничивания) поверхности сердечника. Удобство метода состоит в том, что для всех магнитов, как бы они ни были расположены, в файле свойств задается один блок и два края (положительный и отрицательный).

Невозможность применения этого метода проявляется тогда, когда магнит имеет фигурные очертания (сегменты и сектора с малым радиусом кривизны, цельные многополюсные кольца, магниты с канавками на боковых поверхностях, трапеции). Здесь необходимо использовать второй метод. Однако в этом случае необходимо каждый магнитный блок задавать самостоятельно, указывая в его характеристике угол направления намагничивания в соответствии с принятой

системой координат. Для декартовой системы координат это угол вектора намагниченности относительно оси абсцисс, отсчитываемый против часовой стрелки, а для полярной – угол того же вектора относительно радиуса-вектора, проведенного из начала координат в центр магнита. Таким образом, необходимо определить столько блоков, сколько магнитов в рассматриваемой системе. Это неудобство не имеет места, когда магниты расположены центрально-симметрично относительно начала координат (например, магниты в индукторе электрической машины). При использовании полярной системы координат при любом числе магнитов необходимо задать только два блока-магнита: один с углом равным нулю (например, северные полюсы), и второй – с углом 180^0 (южные полюсы).

В связи с изложенным очевидно, что для рассматриваемого двигателя был применен именно второй метод, поскольку, как уже отмечалось выше, его 6-полюсный индуктор состоит из тонких сегментов, имеющих толщину в середине 8.5 мм, а по краям – всего 2.6 мм (радиус кривизны наружной поверхности 60 мм при ширине сегмента 52 мм).

При анализе электрических машин и, в частности, вентильных двигателей возникает проблема задания н.с. якоря. Это необходимо, чтобы учесть влияние реакции якоря на магнитное состояние машины и для того, чтобы рассчитать момент. Целесообразно эту проблему решать в два этапа: определить зоны, занимаемые той или иной фазой в соответствии с типом обмотки (число слоев, число фаз, число секций в фазе, шаг секций, способ их соединений), а потом задать токи в них (точнее – фиктивные плотности токов, отнесенные ко всей зоне, занимаемой соответствующей обмоткой, т.е. для двухслойной обмотки – к половине площади паза, для однослойной – ко всей площади паза), обеспечив необходимую ориентацию н.с. якоря относительно осей индуктора. Очевидно, что второй этап проводится по-разному применительно к конкретному типу машины.

В нашем случае, в случае анализа вентильного двигателя, обмотка которого получает питание от полупроводникового управляемого инвертора, в каждый момент времени может иметь место одна из двух ситуаций:

1. по одной фазе протекает ток в условно принятом положительном направлении, а по второй – в противоположном, третья фаза обесточена;
2. по одной фазе протекает ток в условно принятом положительном направлении, а по второй и третьей – половинный ток течет в противоположном направлении.

Таким образом, в двигателе имеет место «прыгающая» н.с. реакции якоря, причем величина "прыжка" β зависит от схемы инвертора и способа управления им. В различных случаях она может колебаться от $2\pi/m$ до $\pi/2m$ эл. рад. В связи с этими "прыжками" момент вентильного двигателя M пульсирует по закону синуса в диапазоне изменения аргумента $\pi/2 \pm \beta/2$, т.е.

$$M_0 \cdot \sin(\pi/2 \pm \beta/2) \leq M \leq M_0,$$

где M_0 – максимальный момент двигателя, соответствующий случаю, когда ось н.с. реакции якоря перпендикулярна магнитной оси индуктора (отметим при этом, что в этот момент имеет место чисто поперечная реакция якоря). Поскольку именно этот момент представляет наибольший интерес (при необходимости, зная M_0 , можно рассчитать момент в любой точке, а также средний момент), необходимо так распределить токи по фазам, чтобы их результирующая н.с. была перпендикулярна оси индуктора.

К сожалению, эта задача не имеет общего решения. В каждом конкретном случае необходимо вначале построить звезду н.с. всех секций обмотки, с учетом её схемы, а также величины и направления тока в каждой фазе, определить направление результирующего вектора с привязкой его к пазу, условно принятому за первый, а затем ориентировать индуктор так, чтобы этот результирующий вектор совпал с нейтралью индуктора. Дополнительным осложнением при этом может явиться переменное число витков в секциях, что часто применяется в концентрических обмотках для снижения содержания высших гармоник. В случае если Z (число пазов) и p не являются взаимно простыми числами, задача несколько упрощается, т.к. звезда н.с. включает в себя не Z векторов (это для двухслойной обмотки, для однослойной – $Z/2$), а в D_m раз меньше (D_m – наибольший общий делитель чисел Z и p).

Рассмотрим изложенную методику на примере расчета двигателя DVU3M215. Необходимые для этого обмоточные данные имеют следующие значения (обмотка двухслойная петлевая с идентичными секциями, шестизонная):

- число пазов (Z) – 27,
- число пар полюсов (p) – 3,
- число фаз (m) – 3,
- шаг секции (y) – 4.

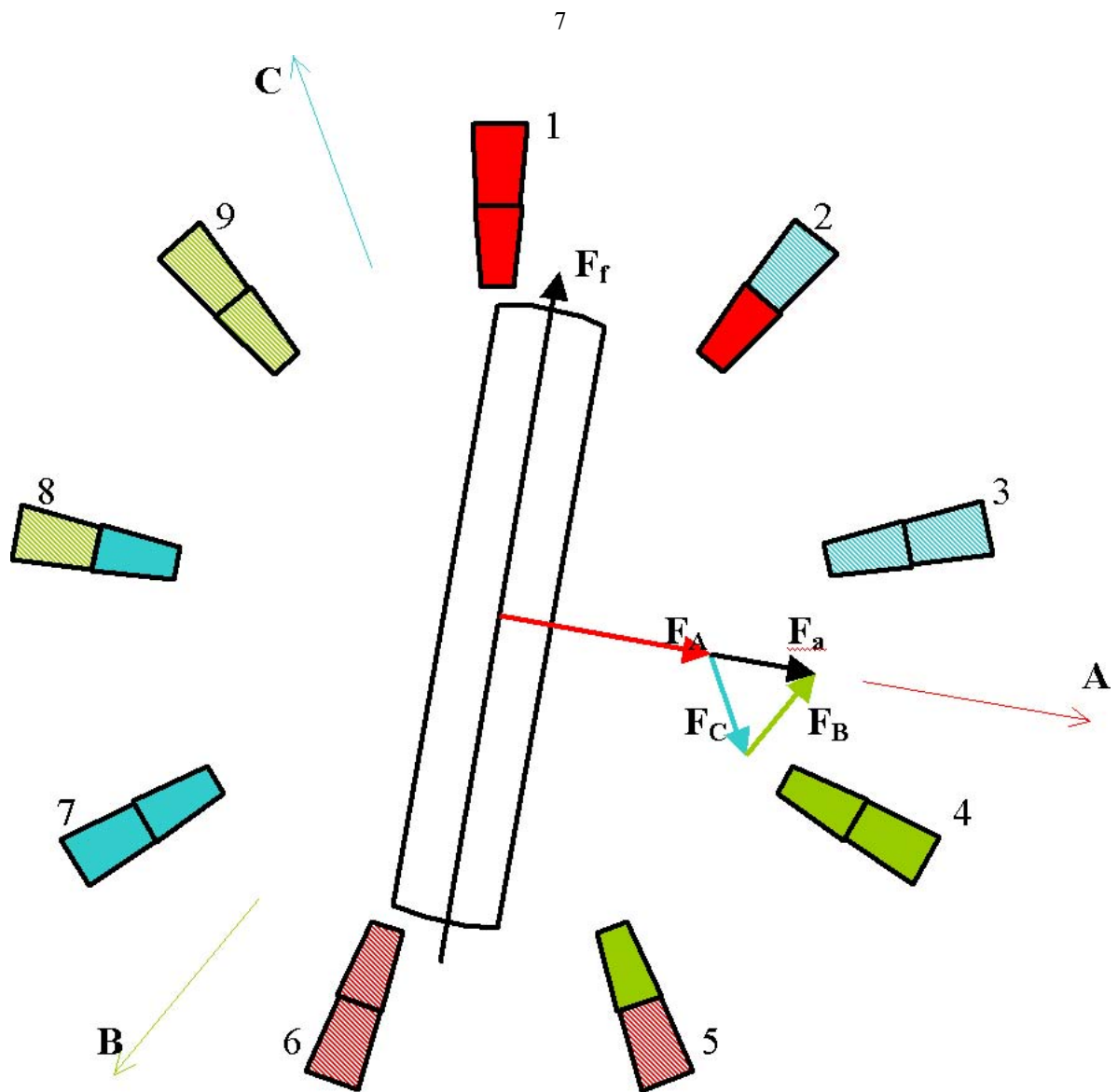
Здесь Z и p имеют наибольший общий делитель $D_m=p=3$, т.е. достаточно рассмотреть $Z/D_m=9$ пазов вместо 27 и два полюса вместо шести.

Осуществим первый этап задания н.с. якоря, т.е. распределим фазы по пазам. Для этого составим 9-лучевую звезду, присвоим каждому лучу номер от 1 до 9 (условимся нумеровать по часовой стрелке) и по этой звезде определим состав всех фаз, присвоив каждой секции номер паза, где лежит её начало и поместив начало первой секции фазы A в первый паз. Найденные составы могут быть представлены следующими числовыми рядами:

фаза A : 1+2-6; фаза B : 4+5-9; фаза C : 7+8-3.

Здесь знак плюс означает, что секция соединяется согласно (её начало присоединяется к концу предыдущей секции), знак минус – встречно (её конец присоединяется к концу предыдущей секции).

В соответствии с этими данными делим паз на два слоя и распределяем фазные зоны так, как показано на нижеследующей схеме (см. также рис. 1):



| Номер паза | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Верхний слой паза | +A | +A | -C | +B | +B | -A | +C | +C | -B |
| Нижний слой паза | +A | -C | -C | +B | -A | -A | +C | -B | -B |

Рис. 1. Векторная диаграмма намагничивающих сил вентильного двигателя. Сплошная заливка – положительное направление тока, штриховка – отрицательное.

Теперь перейдем ко второму этапу решения задачи, определим ориентацию н.с. якоря и индуктора.

Поскольку шаг секции равен 4, то магнитная ось любой секции совпадает с пазом, номер которого на половину шага больше номера самой секции, например ось первой секции, витки которой идут из первого паза в пятый, совпадает с осью третьего паза. В соответствии с этим правилом легко установить, что результирующие оси н.с. фаз при положительном направлении токов в каждой из них будут занимать положения между следующими пазами (тонкие стрелки на рис. 1):

фаза A: 3 и 4;

фаза B: 6 и 7;

фаза C: 9 и 1.

Рассмотрим тот момент, когда питание получают все три фазы, причем, если в фазе A течет полный ток от начала к концу (примем это направление за положительное), то в фазах B и C – половинный ток от конца к началу, т.е. $-C = +A/2$, $+C = -A/2$, $-B = +A/2$, $+B = -A/2$. В результате такого токораспределения, ось н.с. фазы A остается на вышеуказанном месте, а оси н.с. фаз B и C поворачиваются на 180° . В итоге результирующая н.с. трех фаз F_a определяется как сумма трех векторов, один из которых проходит посередине между пазами 3 и 4 (F_A), второй совпадает с пазом 2 (F_B), а третий – совпадает с пазом 5 (F_C). При этом модули векторов F_B и F_C вдвое меньше модуля F_A (толстые стрелки на рис. 1). Приняв, что угловая координата первого паза равна нулю и учитывая, что пазовое деление составляет 40° , получаем, что результирующая ось F_a совпадает с осью фазы A и имеет координату 100° . Как уже указывалось выше, ось индуктора F_f должна быть перпендикулярна результирующей оси н.с. якоря, т.е. её координата равна 10° . В заключение необходимо учесть, что здесь указаны электрические градусы. Тогда, учитывая, что $p=3$, получаем окончательный итог: в модели ось любого из полюсов индуктора должна лежать на 3.33° от первого паза, отсчитывая угол по часовой стрелке.

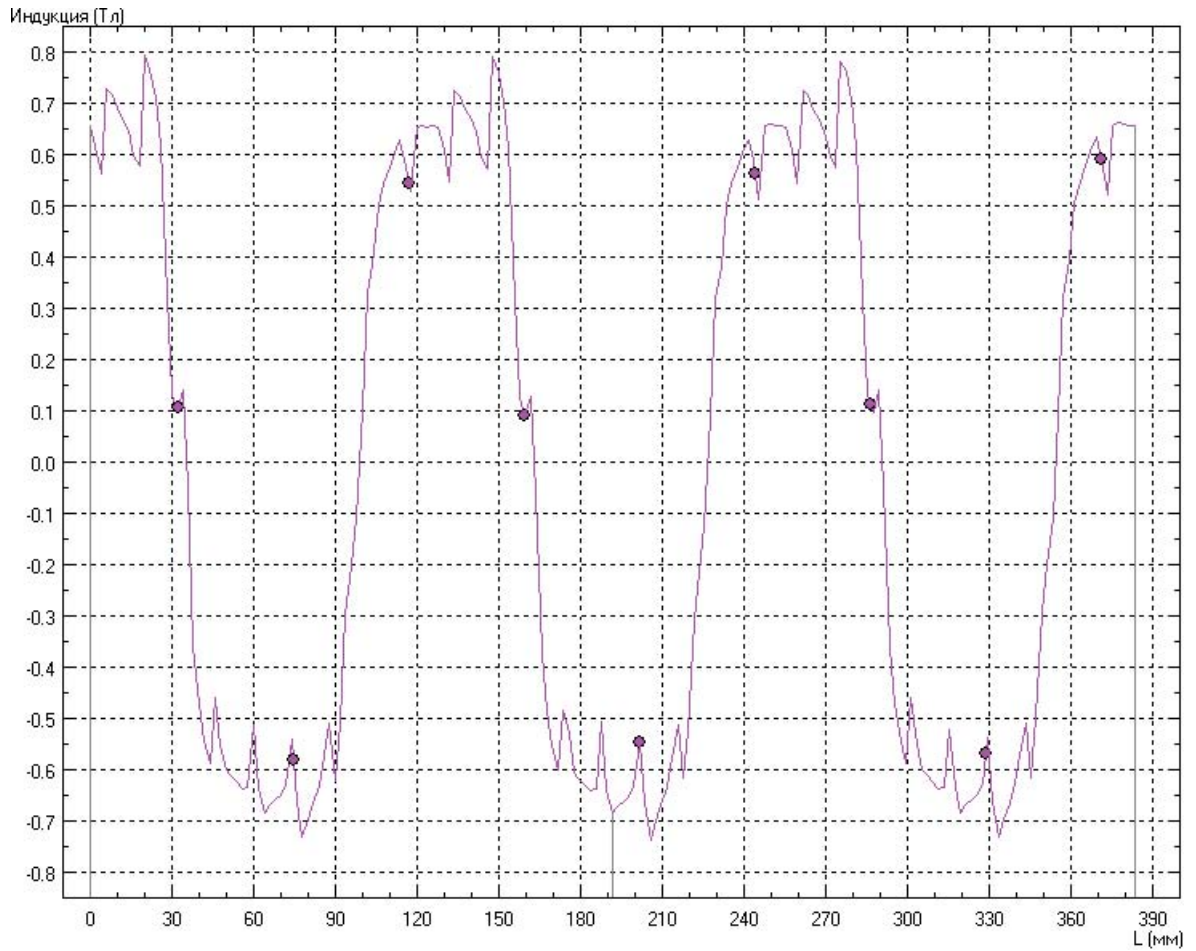


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в зазоре.

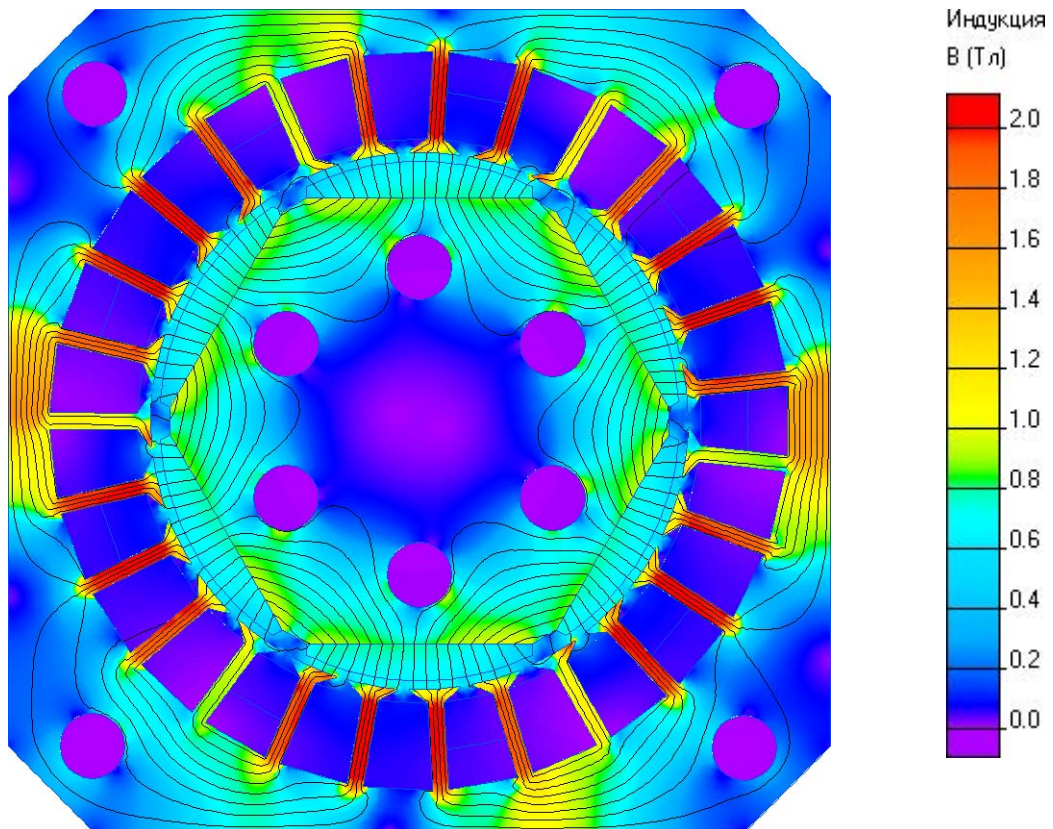


Рис. 3. Распределение магнитного поля в сердечнике.

На представленных рисунках приведены результаты расчета модели, заданной вышеуказанными файлами. При этом индуктор ориентирован именно так, как

здесь указывалось: перпендикулярно оси н.с. реакции якоря. Интересно отметить, что на графике индукции в воздушном зазоре видно, как поле реакции искажает поле индуктора, подмагничивая один край магнитов и размагничивая другой. Максимальный момент по расчету после приведения его к реальной длине пакета оказался равным 47.7 Н·м при токе 14.3 А, в то время как эксперимент, проведенный с опытным образцом двигателя дал больший результат – 57.4 Н·м, что может быть объяснено тем, что в расчет закладывались гарантированные (минимальные) значения параметров магнитов, в то время как в реальности они оказались существенно выше.

Литература.

1. Двигатели вентильные синхронные DVU2M165, DVU2M215. ЗАО "Электротехнические системы 1", С.-Петербург, 1992, www.ets1.spb.ru.
2. ELCUT. Комплекс программ моделирования двумерных физических полей с помощью метода конечных элементов. НПКК "ТОР", С.-Петербург, 1994.