

Моделирование магнитного поля асинхронного двигателя**при холостом ходе**

Целью работы является изучение свойств и особенностей магнитного поля асинхронной машины при холостом ходе, оценка влияния насыщения магнитной цепи на форму распределения индукции в воздушном зазоре, оценка характера намагничивания в заданных зонах магнитопровода, что имеет значение при уточненном расчете потерь в стали.

На рис. 1 показано распределение поля в поперечном сечении четырехполюсного асинхронного двигателя малой мощности 4A100L4У3. Моделируется холостой ход, влияние зубчатости ротора не учитывается, в соответствии с чем ротор принят гладким.

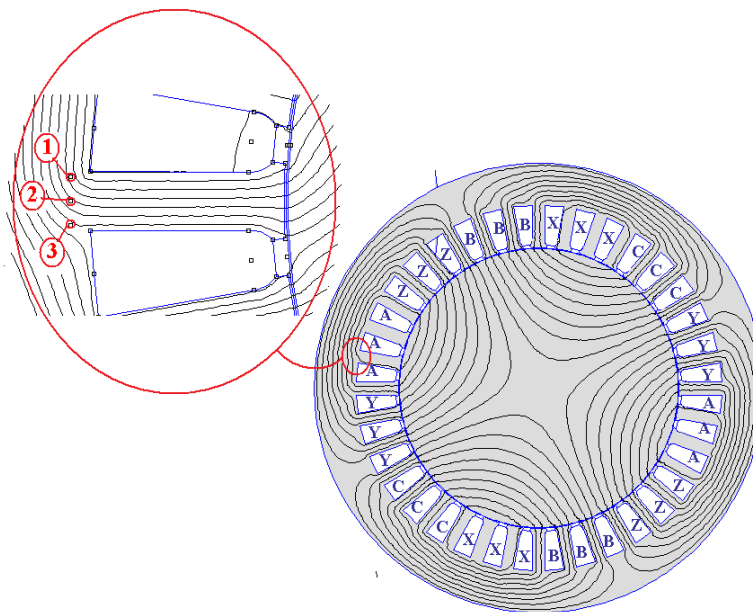


Рис. 1. Картина поля в поперечном сечении асинхронного двигателя при холостом ходе

Исходные данные для построения конечно-элементной модели могут быть взяты из таблиц справочника по серии асинхронных двигателей 4А (доступен на сайте кафедры электромеханики). В справочнике приведены размеры, параметры схемы замещения, обмоточные данные и данные номинального режима работы.

После того, как построена модель поперечного сечения (см. рис.1), необходимо задать плотности тока на участках модели, соответствующих пазам, в которых размещена обмотка статора. По заданным параметрам Г-образной схемы замещения легко определяется ток холостого хода в относительных единицах. По найденному значению можно найти плотность тока в проводниках обмотки при холостом ходе, т.к. она меньше плотности тока при номинальной нагрузке (в справочнике задано действующее значение номинальной плотности тока) во столько же раз, во сколько найденный ток холостого хода (в о.е.) меньше единицы. Приведенные в таблицах обмоточные данные (число параллельных ветвей, число эффективных проводов в пазу, схема обмотки) позволяют определить действующие значения пазовых токов. Если в двигателе используется двухслойная обмотка с укороченным шагом, следует учитывать, что в пазу могут находиться катушечные стороны различных фаз. В этом случае следует разделить участки пазов на две равные по площади части и вычислять токи катушечных сторон. Найдя затем амплитудные значения пазовых токов (или токов катушечных сторон в случае двухслойной обмотки) при холостом ходе и разделив их на соответствующие площади, можно, наконец, найти искомые плотности тока на пазовых участках модели.

При решении полевых задач на магнитостатических моделях задаются мгновенные значения плотности тока в пазах. Условимся считать, что токи в фазах изменяются во времени синусоидально, токи в фазах $B-Y$ и $C-Z$ отстают от тока в фазе $A-X$ соответственно на треть и две трети периода и что в начальный момент времени ток в фазе $A-X$ достигает максимума (при этом магнитная ось симметричной трехфазной обмотки совпадает с магнитной

осью фазы $A-X$, легко убедиться в этом можно по картине поля, рассчитанной для этого момента времени). Рассчитывая значения плотности тока для других моментов времени и задавая их на соответствующих участках модели, можно проследить за изменением значений индукции в выбранных точках наблюдения или за изменением распределений индукции на выбранных участках (контурах).

На рис. 2 показаны распределения индукции при холостом ходе по цилиндрической поверхности, проведенной по середине высоты воздушного зазора. Если поле плоскопараллельно, анализ его можно вести по плоской картине поля, представленной на плоскости поперечного сечения машины. Следом цилиндрической поверхности в этом случае является контур (линия), представляющий собой окружность, проведенную на участке модели, соответствующем воздушному зазору. Для анализа распределения индукции (графика) удобно воспользоваться средствами пакета *MathCAD* (студентам предлагается воспользоваться файлом *AirGapFieldHarman.mcd*, позволяющим выполнять гармонический анализ периодической кривой с помощью функции *fft* (*fast Fourier transform* – быстрое преобразование Фурье).

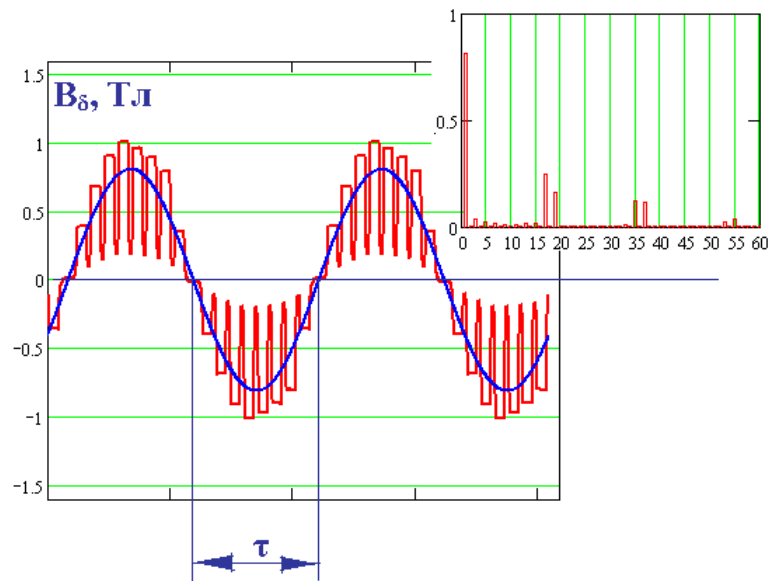


Рис. 2. Распределение индукции в воздушном зазоре асинхронного двигателя 4A100L4U3 при холостом ходе и его гармонический состав

Насыщение магнитной цепи может оказывать заметное влияние на форму поля в зазоре машины. При этом насыщение ярма и насыщение зубцовой зоны проявляются по-разному. На рис. 3 показано распределение индукции в воздушном зазоре при преобладающем насыщении одной из двух названных зон. К большему насыщению привело изменение одного из характерных размеров машины. Сравнивая распределения индукции, приведенные на рисунках 2 и 3, попробуйте ответить на вопрос: изменение какого размера вызвало такое изменение формы поля.

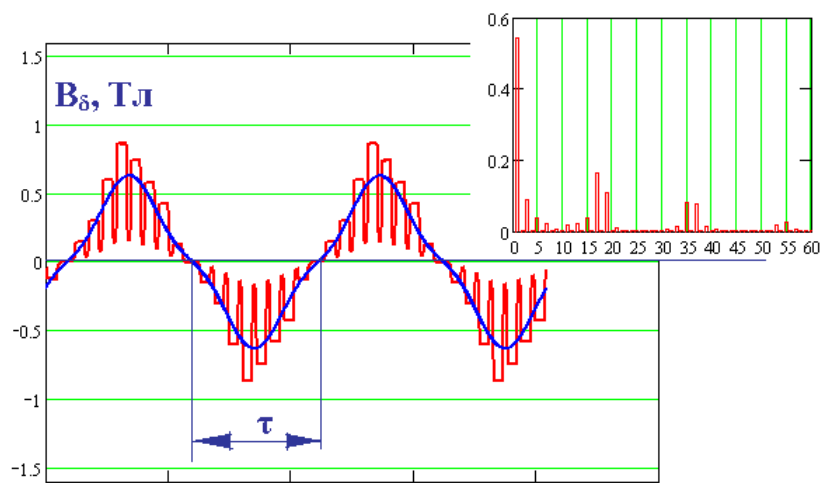


Рис. 3. Распределение индукции в воздушном зазоре асинхронного двигателя 4A100L4У3 при холостом ходе и его гармонический состав при повышенном насыщении одной из зон сердечника статора. На графике показана сумма первой и третьей гармоник индукции.

Выполнение серии численных экспериментов, в которых плотности тока в катушечных сторонах фаз обмотки изменяются в соответствии с заданными законами позволяет достаточно наглядно показать, как перемагничивается сталь магнитопровода в выбранных точках наблюдения. На рис. 4 показан характер годографов векторов индукции в точках вблизи основания зубца статора (три точки, в которых производились «измерения», показаны на рис. 1).

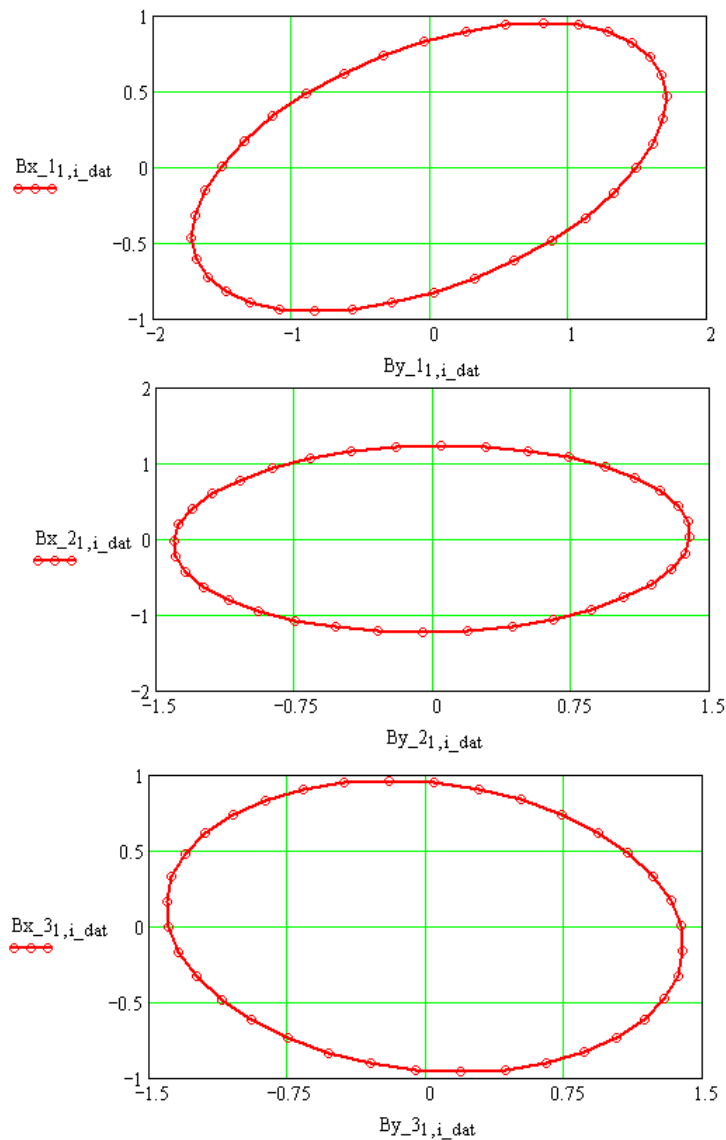


Рис. 4. Годографы векторов индукции в трех точках наблюдения вблизи основания зубца статора.

Как следует из рис. 4, у основания зубца перемагничивание имеет вращательный характер, в то время как в самом зубце вектор индукции не вращается, а пульсирует.

Ниже приведен текст *Lua*-сценария, с помощью которого, построив модель, можно смоделировать временной процесс как последовательность $nt = 36$ состояний, соответствующих nt мгновенным значениям фазных токов на одном периоде сети (0,02 сек. при 50 Гц). К числу дополнительных

исходных данных, не указанных в таблицах справочника, относится площадь паза, которую следует вычислить или определить с помощью опции постпроцессора *FEMM Block cross-section area* (Площадь (выделенного) блока). При использовании большего числа исходных данных сценарий может быть дополнен, например, измерением и записью графиков распределения индукции в воздушном зазоре и других результатов моделирования. Более подробно с возможностями программирования в *FEMM* можно ознакомиться в разделе *Help* программы и в методическом пособии «Моделирование магнитных полей в электрических машинах».

---Файлы для записи результатов:

```
outfile_1 = "c:\\My FEMM-files\\Load01.txt"
outfile_2 = "c:\\My FEMM-files\\Load02.txt"
```

---Исходные данные:

---Частота питания, период и круговая частота:

```
freq=50---Гц
period=1/freq---сек.
pi=3.14159
omega=2*pi*freq---рад.
```

---Число временных интервалов на периоде и длина интервала:

```
nt=36
dt=period/nt
```

---Номинальная плотность тока в обмотке статора (действующее значение):

```
j_nom_rms=6.3---А/мм2
```

---Площадь поперечного сечения паза статора:

```
S_sl_1=85.47---мм2
```

---Число пар полюсов:

```
ppair=2
```

---Число пазов статора:

```
Z1=36
```

---Число катушек в фазе:

```
n_coil=6
```

---Число эффективных витков в катушке:

```
w_coil=28
```

---Число параллельных ветвей

```
n_prll=1
```

---Число элементарных проводов в одном эффективном:

```
n_elem=1
```

---Диаметр элементарного провода по меди:

$d_w=1.3$ ---мм

---Индуктивное сопротивление взаимоиндукции:

$x_{12}=2.4$ ---отн. ед.

---Координаты контрольных точек:

$x_1=-70$ ---мм

$y_1=-2$ ---мм

$x_2=-70$ ---мм

$y_2=0$ ---мм

$x_3=-70$ ---мм

$y_3=2$ ---мм

---Предварительные вычисления:

---Перевод из радиан в градусы:

$raddeg=180/\pi$

---Коэффициент заполнения паза статора медью:

$k_{fill_Cu}=(\pi*d_w^2*0.25*w_{coi}*n_{elem})/S_{sl_1}$

---Намагничивающий ток (в отн. ед., приближенно):

$I_{mu_pu}=1/x_{12}$

---Плотность тока при холостом ходе (действ. знач.):

$j_{NL_rms}=j_{nom_rms}*I_{mu_pu}$

---Средняя по площади паза плотность тока (ампл. значение)

$j_{max}=\sqrt{2}*j_{NL_rms}*k_{fill_Cu}$

---Отладочная печать (в *Lua*-консоль):

```
print("k_fill_Cu",k_fill_Cu)
```

```
print("I_mu_pu",I_mu_pu)
```

```
print("j_NL_rms",j_NL_rms)
```

```
print("j_max",j_max)
```

---**ОСНОВНОЙ ЦИКЛ**

---Время и число шагов:

$t=-dt$

$n_{step}=0$

while $t \leq period*(1/1)$ **do**

$t=t+dt$

$n_{step}=n_{step}+1$

---Расчет и задание плотностей тока в пазах статора:

$jA=j_{max}*\cos(\omega*t*raddeg)$

```

jX=-jA
jB= j_max*cos(omega*t*raddeg-120)
jY=-jB
jC= j_max*cos(omega*t*raddeg-240)
jZ=-jC

```

```

mi_modifymaterial("A",4,jA)
mi_modifymaterial("X",4,jX)
mi_modifymaterial("B",4,jB)
mi_modifymaterial("Y",4,jY)
mi_modifymaterial("C",4,jC)
mi_modifymaterial("Z",4,jZ)

```

```

mi_analyze()
mi_loadsolution()

```

-----**Определение значений индукции в контрольных точках:**

```

Are,Aim,B1re,B1im,B2re,B2im,Sig,E,H1re,H1im,H2re,H2im,Jere,Jeim,Jsre,Jsим,
Mu1re,Mu1im,Mu2re,Mu2im,Pe,Ph=mo_getpointvalues(x1,y1)

```

```

B_x_1=B1re

```

```

B_y_1=B2re

```

```

Are,Aim,B1re,B1im,B2re,B2im,Sig,E,H1re,H1im,H2re,H2im,Jere,Jeim,Jsre,Jsим,
Mu1re,Mu1im,Mu2re,Mu2im,Pe,Ph=mo_getpointvalues(x2,y2)

```

```

B_x_2=B1re

```

```

B_y_2=B2re

```

```

Are,Aim,B1re,B1im,B2re,B2im,Sig,E,H1re,H1im,H2re,H2im,Jere,Jeim,Jsre,Jsим,
Mu1re,Mu1im,Mu2re,Mu2im,Pe,Ph=mo_getpointvalues(x3,y3)

```

```

B_x_3=B1re

```

```

B_y_3=B2re

```

```

handle=openfile(outfile_1,"a")

```

```

write(handle,B_x_1,"",B_y_1,"",B_x_2,"",B_y_2,"",B_x_3,"",
        "B_y_3,"n")

```

```

closefile(handle)

```

end---КОНЕЦ ОСНОВНОГО ЦИКЛА

Программа работы.

1. Для заданного типоразмера (см. таблицу) найти в таблицах Справочника по двигателям серии 4А (можно воспользоваться сайтом кафедры ЭМ) размеры, параметры и обмоточные данные двигателя.

2. Рассчитать значения плотности тока, которые необходимо задать на участках модели, соответствующих катушечным сторонам фаз обмотки двигателя при моделировании холостого хода.
3. Построить конечно-элементную модель, задав граничные условия и плотности тока в пазах, соответствующие начальному моменту времени.
4. По результатам моделирования поля для начального момента времени определить распределение индукции в воздушном зазоре и его гармонический состав.
5. Изменить размеры поперечного сечения двигателя таким образом, чтобы при умеренном насыщении зубцовой зоны зона ярма статора оказалась сильно насыщенной. Оценить изменение гармонического состава распределения индукции в зазоре.
6. Изменить исходные данные модели таким образом, чтобы зубцовая зона оказалась насыщенной заметно больше, чем зона ярма (предварительно отменив изменения, сделанные при выполнении п. 6). Оценить изменение гармонического состава распределения индукции в зазоре в этом случае.
7. Воспользовавшись *Lua*-сценарием, приведенным в описании работы, смоделировать временной процесс на протяжении одного периода сети. По результатам моделирования определить годографы векторов индукции в назначенных точках наблюдения (назначить самостоятельно).
8. Сделать выводы по работе, составить отчет (презентацию).

Вариант	Типоразмер двигателя	Мощность
1	4A100S2Y3	4,0 кВт
2	4A112M2Y3	7,5 кВт
3	4A132M2Y3	11,0 кВт
4	4A100L4Y3	4,0 кВт
5	4A112M4Y3	5,5 кВт
6	4A132M4Y3	11,0 кВт
7	4A160M4Y3	18,5 кВт