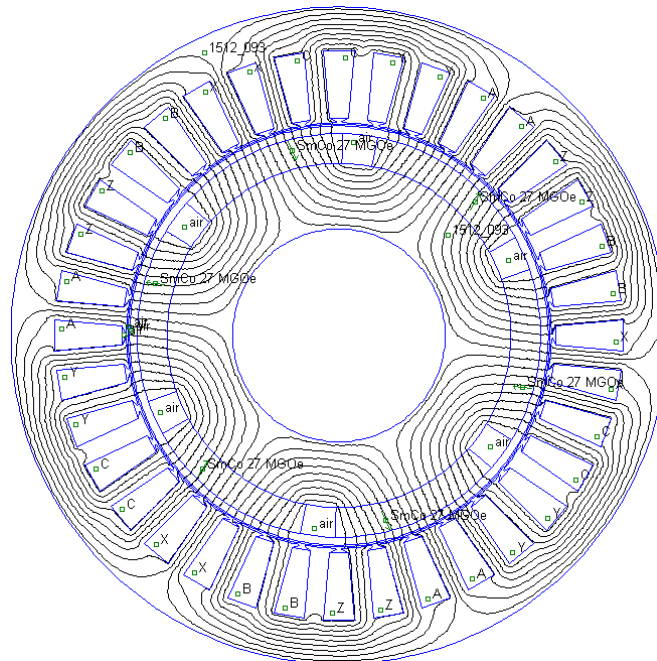


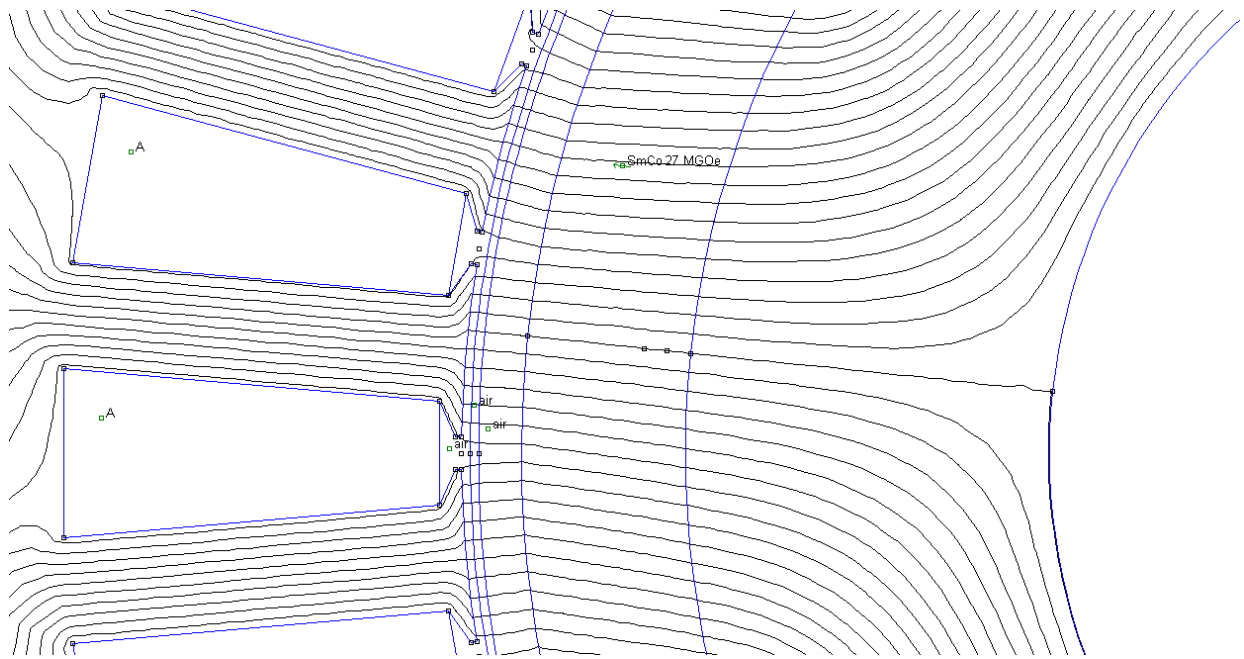
**Определение ЭДС и потокосцеплений трехфазных обмоток***Методическая часть.*

Рассмотрим несколько способов определения потокосцепления фазы трехфазной обмотки статора на примере синхронного генератора с поверхностными постоянными магнитами на роторе. Некоторые данные машины: диаметр расточки – 500 мм, внешний диаметр сердечника статора – 772 мм, число пазов на статоре – 36, число пар полюсов – 3, частота вращения – 400 об/мин, обмотка статора – однослойная, число эффективных витков в катушке – 36, число параллельных ветвей – 3, радиальная толщина магнитов – 35 мм, немагнитный зазор между внешней поверхностью магнитов и поверхностью расточки статора (механический зазор плюс толщина немагнитного банджа) – 12,7 мм.

Картина поля в поперечном сечении генератора при холостом ходе показана на рис. 1.



**Рис. 1. Картина поля при холостом ходе при произвольном положении ротора.**



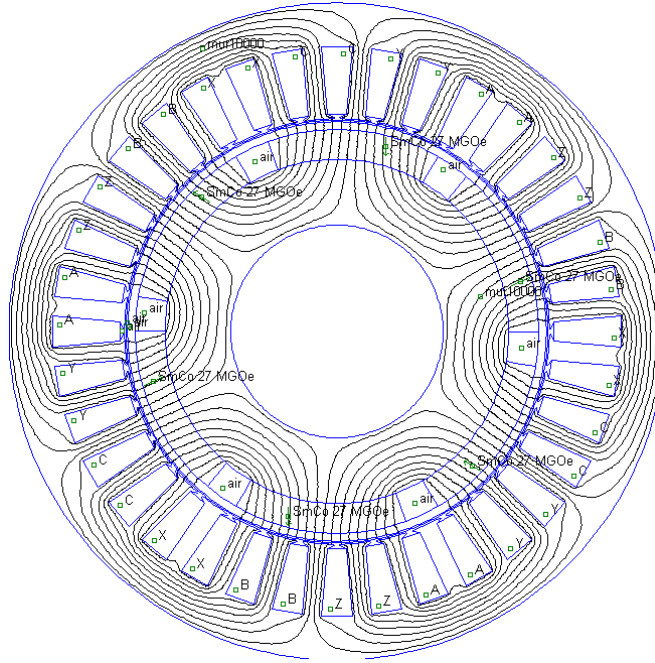
**Рис. 2. Фрагмент картины поля в окрестности паза №1. В воздушном зазоре проведен контур, с которого считываются данные для построения распределения индукции вдоль зазора. Начало контура – на оси первого паза.**

На рис. 2 в увеличенном масштабе показан фрагмент картины поля в окрестности паза, который условимся считать первым. При формировании модели был предусмотрен т. наз. *контур графика* – окружность, проведенная на средней высоте зазора, причем начало этого контура (и одновременно конец его) находится на оси первого паза, т.е. располагается на горизонтальной линии, проходящей через центр поперечного сечения машины. При работе с постпроцессором программы *FEMM* можно, выделив этот контур, посмотреть распределение индукции в воздушном зазоре и, записав в виде текстового файла значения координат точек контура и соответствующих им амплитуд индукции (число точек при этом должно быть кратно 2 в целой степени), выполнить гармонический анализ поля в зазоре, например, с помощью встроенной функции *MathCAD*'а *fft*.

Мы рассмотрим несколько способов определения мгновенного значения потокосцепления фазы обмотки. Каждый из этих способов может быть использован при произвольном положении ротора относительно статора. Удобнее, однако, выбрать такое его положение, которое соответствует мак-

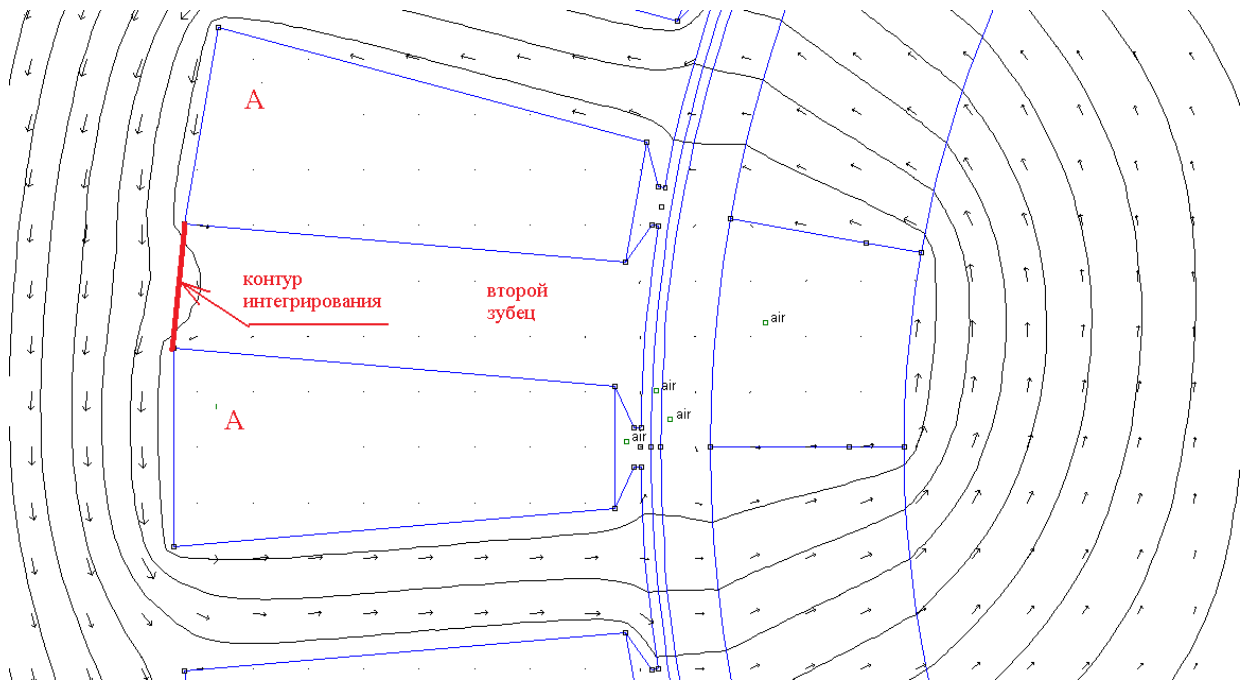
симальному потокосцеплению. Очевидно, что в этом положении ось постоянного магнита (для определенности – северного полюса) должна совпадать с магнитной осью фазы. На рис. 1 каждая фаза представлена тремя катушечными группами, содержащими по две катушки. В силу симметрии достаточно рассмотреть одну катушечную группу какой-либо фазы, например, первую группу фазы *AX*, катушечные стороны которой расположены в пазах 1, 2, 7 и 8. Магнитная ось этой катушечной группы совпадает с осью пятого зубца, разделяющего фазные зоны *B* и *Y* (первый зубец находится между первым и тридцать шестым пазом, второй зубец – между первым и вторым пазом и т.д.). Если на построенной модели не выполняется условие совпадения осей полюса и катушечной группы, как, например, на рис. 1, следует «довернуть» ротор до требуемого положения. Сделать это можно следующим образом. Работая в препроцессоре (на стадии формирования или корректировки модели), выделив с помощью правой клавиши мыши блок магнита и нажав клавишу *Space*, можно определить угловое положение ротора. Угол наклона магнитной оси катушечной группы к горизонтали легко найти, зная угол, приходящийся на одно зубцовое деление статора. Затем следует выделить все элементы, относящиеся к ротору, и осуществить их поворот (*Edit ->Move ->Rotation* – Редактирование -> Перемещение -> Вращение)) на требуемый угол.

На рис. 3 показана картина поля в поперечном сечении генератора при положении ротора, соответствующем максимальному потокосцеплению фазы *AX*. Кроме поворота ротора в модели рис. 3 было произведено еще одно изменение: сталь сердечника статора с реальной нелинейной кривой намагничивания была заменена сталью с постоянной относительной магнитной проницаемостью, равной 10000. Эта замена не только ускорила расчет поля (кстати, при выбранной дробности сетки (число узлов равнялось примерно 75 тыс.), уменьшение времени счета весьма невелико – около 15 с.), но, главное, позволила при сравнительной оценке точности способов определения потокосцепления фазы исключить влияние насыщения стали.



**Рис. 3.** Картина поля в поперечном сечении генератора при положении ротора, соответствующем максимальному потокоцеплению фазы *AX*.

**Первый** способ определения потокоцепления катушечной группы фазы состоит в суммировании потоков тех зубцов, которые охватывают катушки группы. Этот способ в данном случае обладает достаточно высокой точностью, поскольку сталь имеет большую магнитную проницаемость, а в пазах при холостом ходе отсутствуют токи и, следовательно, потоки рассеяния. При суммировании необходимо учесть, что потоки 1-го и 8-го зубцов сцеплены только с одной катушкой группы, в то время как потоки остальных зубцов – с двумя. Определить зубцовый поток просто – надо провести контур интегрирования в основании зубца и воспользоваться клавишей «*Интегрирование*», выбрав в качестве интегрируемой величины нормальную составляющую индукции  $B_n$ . При суммировании следует учитывать знаки (направления) зубцовых потоков. Для проверки правильности знаков можно воспользоваться векторной картиной поля



**Рис. 4. Контур интегрирования для определения зубцового потока.**

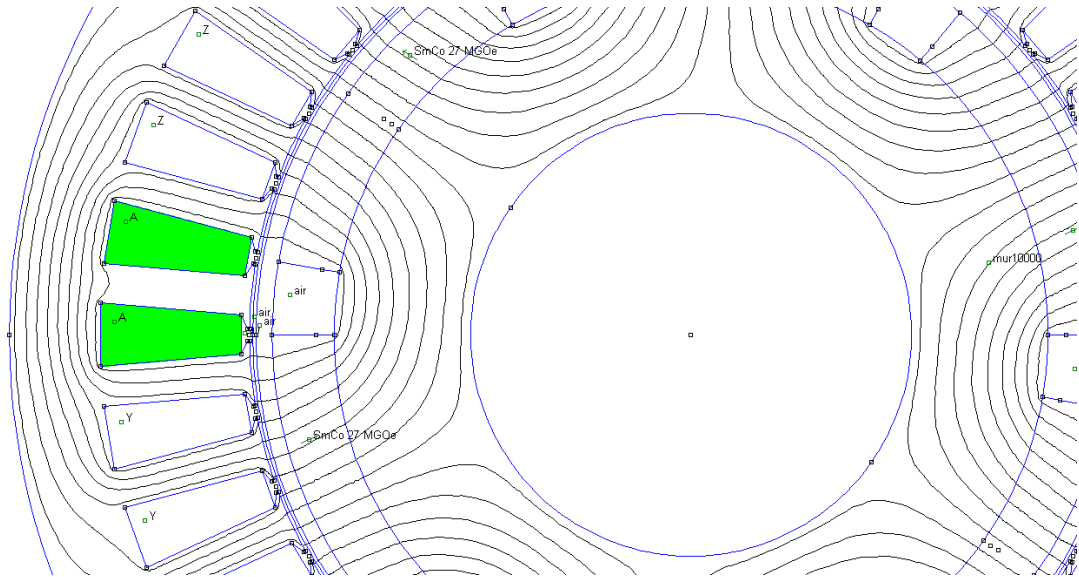
Результат суммирования зубцовых потоков для двигателя с самарий-кобальтовыми постоянными магнитами ( $H_c = 772$  кА/м,  $\mu_r = 1,103$ ):

$$\Psi_{AX(\Phi_z)}^I = 281,33 \cdot 10^{-6} \text{ Вб/мм}$$

(здесь верхний индекс означает, что потокосцепление подсчитывалось для первой катушечной группы фазы AX). Найденная сумма зубцовых потоков равна потокосцеплению фазы на 1 мм длины активной зоны при условии, что каждая катушка состоит из одного витка.

**По второму** способу потокосцепление катушечной группы фазы определяется как разность средневзвешенных (по площадям сечений катушечных сторон) значений векторного магнитного потенциала начальных и конечных катушечных сторон, умноженная на число эффективных витков группы. Для того чтобы найти средневзвешенное значение векторного магнитного потенциала, например, начальных сторон катушечной группы, надо (в постпроцессоре) выделить левой клавишей мыши блоки начальных сторон с именами *A*, затем, нажав клавишу «Интегрирование» и выбрав операцию *A* (*Integral of A/selected area* - Интеграл векторного магнитного потенциала по выделенной площади / выделенная площадь), найти требуемое

значение. Таким же образом надо найти средневзвешенное значение векторного магнитного потенциала конечных сторон катушечной группы, имеющих имена блоков  $X$ . Потокосцепление группы на 1 мм длины активной зоны при условии, что каждая катушка состоит из одного эффективного витка, будет равно удвоенной (при  $q = 2$  группа состоит из двух катушек) разности найденных значений векторного магнитного потенциала.



**Рис. 5. Выделение начальных сторон катушек первой катушечной группы фазы  $AХ$ . При определении потокосцепления фазы таким же образом можно выделить начальные стороны катушек всех катушечных групп фазы.**

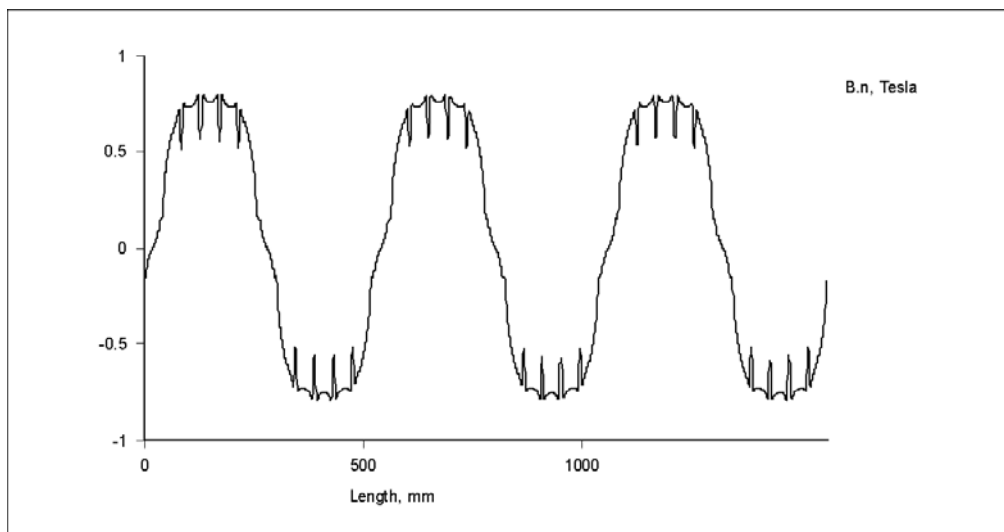
Результат определения потокосцепления первой катушечной группы фазы  $AХ$  по второму способу:

$$\Psi_{AX(\Psi)}^I = w_{\text{гр}}(\Psi_A^I - \Psi_X^I) = 2(70,3679 - (-70,3605)) \cdot 10^{-6} = 281,46 \cdot 10^{-6} \text{ Вб/мм}$$

Полученный результат при данных условиях моделирования практически совпадает с результатом, полученным первым способом.

**Третий** способ определения потокосцепления предполагает проведение гармонического анализа распределения индукции в воздушном зазоре. Проиллюстрируем этот способ на примере рассматриваемого синхронного генератора.

Выделив контур интегрирования в зазоре (контур графика), можно не только посмотреть на мониторе интересующее нас распределение индукции (рис. 6), но и записать в текстовый файл численные данные, позволяющие выполнить гармонический анализ этой функции (предполагается, что на длине контура укладывается целое число периодов интересующей нас пространственной гармоники поля в зазоре (обычно – основной гармоники, имеющей на длине окружности расточки  $p$  периодов)).



**Рис.6.** Распределение нормальной составляющей индукции в воздушном зазоре при холостом ходе. Так выглядит на мониторе график, построенный средствами постпроцессора программы *FEMM*.

Последовательность действий в этом случае следующая. Выделив контур графика (так, чтобы его направление совпадало с направлением вращения поля в машине – в рассматриваемом примере – с направлением движения часовой стрелки) и нажав клавишу с изображением графика, в появившемся окне *X-Y Plot of Field Values* следует выбрать: нормальную составляющую индукции  $B_n$ , число фиксированных точек графика (*Number of points in plot*), равное  $2^N$ , где  $N$  – целое число (при подробном гармоническом анализе  $N$  не должно быть слишком малым, удобно, например, выбрать  $N = 11$ , тогда  $2^N = 2048$ ), выбрать опцию записи в текстовый файл (*Write data to text file*), отказаться от записи в текстовый файл заголовков столбцов (*File*

*Formatting -> Multicolumn text no legend*), дать имя текстовому файлу (*OK ->* запись имени в окне «Сохранить как») и записать текстовый файл, желательно в папку, содержащую *MathCAD*'овские файлы *AirGapFieldHarman* и *Harm\_check*. Открыв файл *AirGapFieldHarman*, надо ввести имя текстового файла в качестве аргумента функции *READPRN*:

ORIGIN := 1

**Число элементов в считываемом файле:**

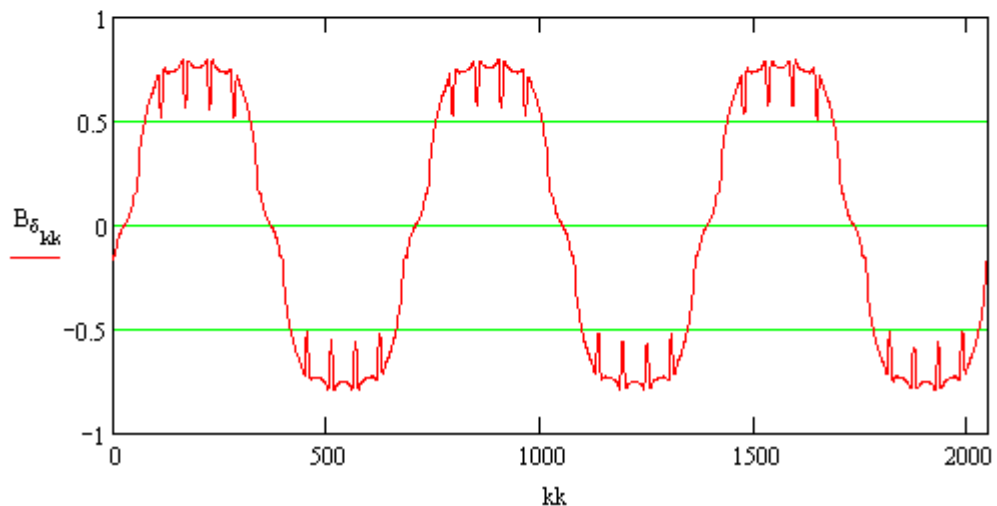
$m\_kk := 11$        $kk\_max := 2^{m\_kk}$        $kk\_max = 2.048 \times 10^3$        $kk := 1..kk\_max$

$B_{\delta dat} := READPRN("500kW\_400rpm\_q2\_Di500\_hslot84.2\_hmagn35\_p3\_NL\_mur10000\_PsiAXmax.txt")$

|                      |  |        |        |        |       |        |        |
|----------------------|--|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| $B_{\delta dat}^T =$ |  | 1      | 2      | 3      | 4     | 5      | 6      |
| 1                    |  | 0      | 0.762  | 1.523  | 2.285 | 3.047  | 3.808  |
| 2                    |  | -0.169 | -0.162 | -0.155 | -0.15 | -0.151 | -0.153 |

$$B_{\delta, kk} := (B_{\delta dat}^T)_{2, kk}$$

|                  |  |        |        |        |       |        |        |
|------------------|--|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| $B_{\delta}^T =$ |  | 1      | 2      | 3      | 4     | 5      | 6      |
| 1                |  | -0.169 | -0.162 | -0.155 | -0.15 | -0.151 | -0.153 |



**Рис.7.** Начало обработки текстового файла с данными графика распределения нормальной составляющей индукции в воздушном зазоре в файле *AirGapFieldHarman*.

Затем строка значений индукции файла данных графика подвергается гармоническому анализу с помощью встроенной функции *fft* (*Fast Fourier transform* быстрое преобразование Фурье):



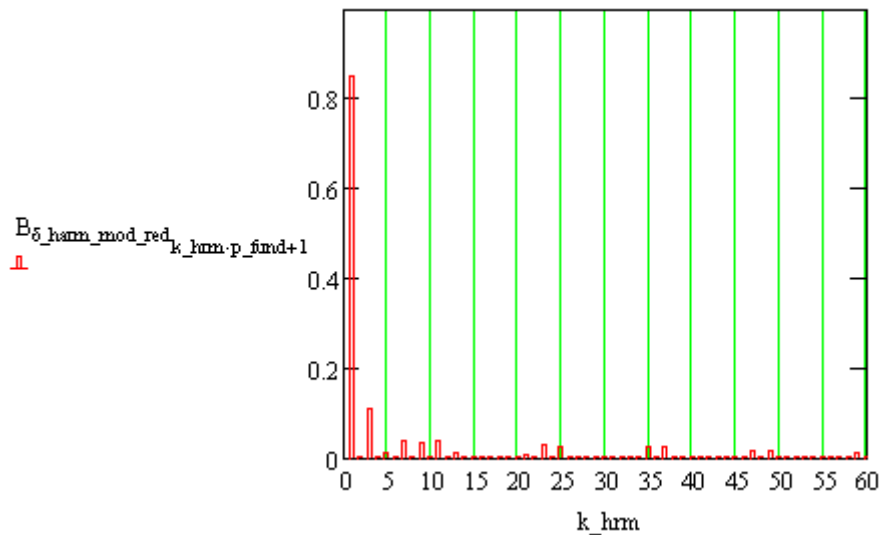
$$B_{\delta\_harm} := \text{fft}(B_{\delta})$$

← FFT-анализ

$$B_{\delta\_harm}^T =$$

|   | 1                     | 2   | 3                               |
|---|-----------------------|---|---------------------------------|
| 1 | $-1.79 \cdot 10^{-3}$ | $-7.495 \cdot 10^{-3} + 5.856i \cdot 10^{-3}$ | $-9.584 \cdot 10^{-3} + 0.023i$ |

и после некоторых преобразований выдаются значения амплитуд пространственных гармоник индукции в зазоре и их фазовых сдвигов относительно начала отсчета контура:



**Рис.8. Гармонический состав поля в зазоре рассматриваемого синхронного генератора при холостом ходе .**

При работе с файлом *AirGapFieldHarman* необходимо указать число пар полюсов интересующей нас гармоники. В рассматриваемом примере число периодов основной гармоники на длине контура графика равно трем:

**Число периодов основной гармоники на рассматриваемом интервале**

$$p\_fund := 3$$

← ИД!!!!!!

**Индекс, соответствующий рассматриваемой гармонике:**

$$harm := 1 \quad ihm := harm \cdot p\_fund + 1 \quad ihm = 4$$

Амплитуды наиболее важных гармоник:

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>постоянная составляющая</b> | $B_{\delta\_harm\_mod\_red\_0.p\_fund+1} = 7.91186 \times 10^{-5}$ |
| <b>первая гармоника</b>        | $B_{\delta\_harm\_mod\_red\_1.p\_fund+1} = 0.84918$                |
| <b>третья гармоника</b>        | $B_{\delta\_harm\_mod\_red\_3.p\_fund+1} = 0.11078$                |
| <b>пятая гармоника</b>         | $B_{\delta\_harm\_mod\_red\_5.p\_fund+1} = 0.0123$                 |
| <b>седьмая гармоника</b>       | $B_{\delta\_harm\_mod\_red\_7.p\_fund+1} = 0.03572$                |
| <b>одиннадцатая гармоника</b>  | $B_{\delta\_harm\_mod\_red\_11.p\_fund+1} = 0.03818$               |
| <b>тринадцатая гармоника</b>   | $B_{\delta\_harm\_mod\_red\_13.p\_fund+1} = 0.01166$               |

Фазовые углы наиболее важных гармоник (в электрических градусах):

|                                |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| <b>постоянная составляющая</b> | $\phi\_harm0.p\_fund+1 = -89.68$   |
| <b>первая гармоника</b>        | $\phi\_harm1.p\_fund+1 = -14.738$  |
| <b>третья гармоника</b>        | $\phi\_harm3.p\_fund+1 = -44.285$  |
| <b>пятая гармоника</b>         | $\phi\_harm5.p\_fund+1 = 107.359$  |
| <b>седьмая гармоника</b>       | $\phi\_harm7.p\_fund+1 = 76.934$   |
| <b>одиннадцатая гармоника</b>  | $\phi\_harm11.p\_fund+1 = 17.743$  |
| <b>тринадцатая гармоника</b>   | $\phi\_harm13.p\_fund+1 = 168.792$ |

По данным гармонического анализа амплитуда основной гармоники поля в зазоре в рассматриваемом примере равна 0,8492 Т. Потокосцепление первой катушечной группы фазы *AX* с основной гармоникой рассчитаем по известной формуле:

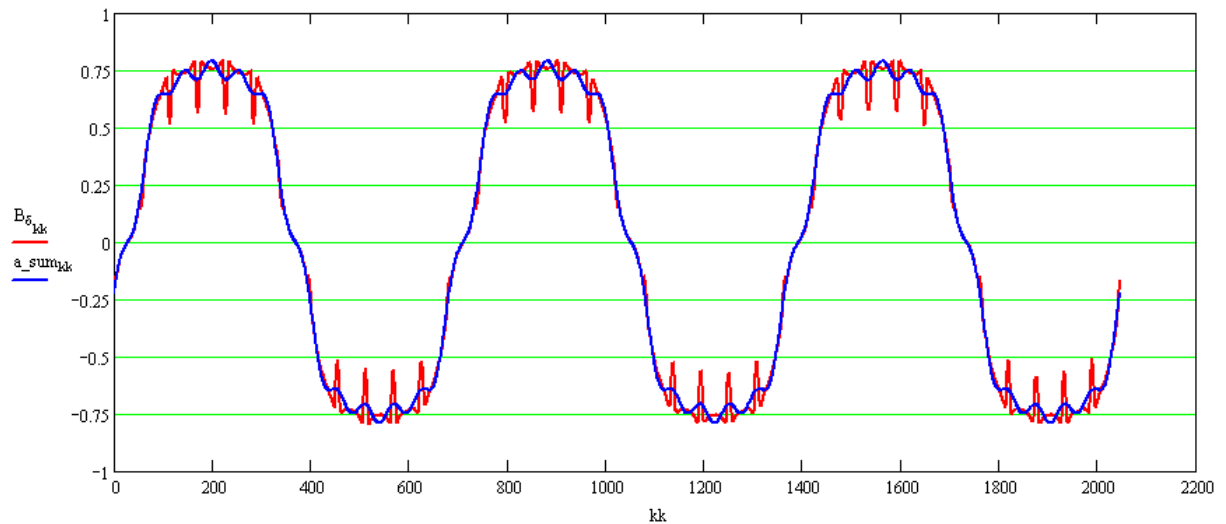
$$\Psi_{AX(B\delta)}^I = (2/\pi)((\pi D_i/2p)l_{\delta})w_{гр}k_w B_{\delta m} =$$

$$= (2/\pi)((\pi 0,5/6)1 \cdot 10^{-3}) \cdot 2 \cdot 0,966 \cdot 0,8492 = 273,4 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$$

Результат, полученный третьим способом, мало отличается от потокосцеплений, рассчитанных по первому и второму способам – он меньше всего на 2,9%. Программа *AirGapFieldHarman*, выполняющая гармонический анализ поля в зазоре, позволяет объяснить это расхождение.

На рис. 9 график исходной функции сравнивается с графиком суммы 1-й, 3-й, 7-й и 9-й гармоник. Как видно, эти графики практически совпадают

друг с другом, из чего можно заключить, что потоки именно этих гармоник составляют в основном потокосцепление фазы и, в частности, катушечной группы.

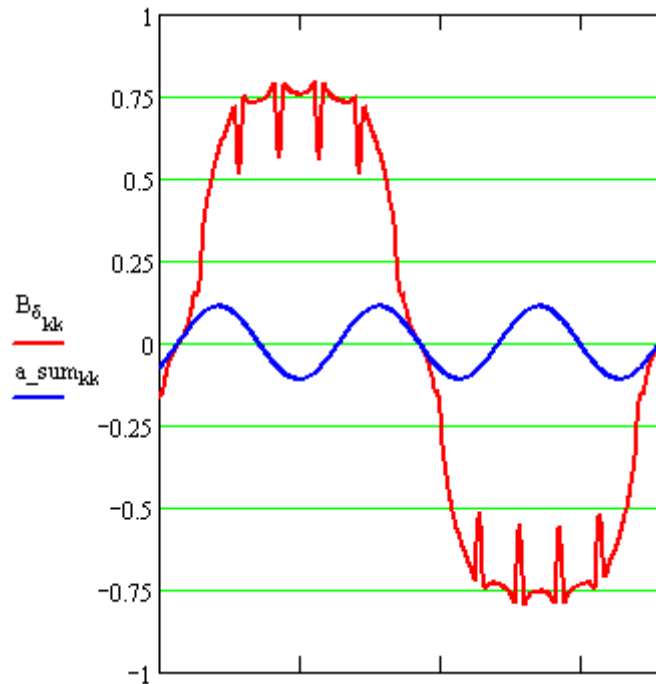


**Рис.9.** Сравнение графиков исходной функции и суммы 1-й, 3-й, 7-й и 9-й гармоник. Работа программы *AirGapFieldHarman*.

Нетрудно показать, что вклад  $j$ -й гармоники в общее потокосцепление в долях потокосцепления основной гармоники определяется отношением амплитуд и номером гармоники:

$$\Psi_j / \Psi_1 = (B_j / B_1) \cdot (1/j),$$

причем в зависимости от фазового угла  $j$ -я гармоника может как увеличивать потокосцепление, так и уменьшать его. Из рис. 10 видно, например, что 3-я гармоника в рассматриваемом случае увеличивает общее потокосцепление, складываясь с потокосцеплением 1-й гармоники.



**Рис.10. Графики исходного распределения нормальной составляющей индукции в зазоре и третьей гармонической этого распределения.**

С учетом вкладов 3-й, 7-й и 9-й гармоник в общее потокосцепление значение  $273,4 \cdot 10^{-6}$  Вб следует умножить на коэффициент 1,033, что дает

$$\Psi_{AX(B\delta)}^I = 282,4 \cdot 10^{-6} \text{ Вб},$$

т.е. результат, весьма близкий к потокосцеплениям, найденным по первому и второму способам.

**Четвертый** способ определения потокосцепления фазы основан на понятии вращающегося результирующего вектора (подробно об этом см. учебник А.В. Иванова-Смоленского «Электрические машины»). В соответствии с теорией вращающихся векторов мгновенное значение потокосцепления фазы равно проекции результирующего вектора потокосцепления, занимающего в рассматриваемый момент времени определенное положение относительно системы координат статора, на пространственную ось фазы. Под пространственной осью фазы можно понимать ее магнитную ось. Если при этом допустить, что результирующий вектор вращается с постоянной угловой скоростью и имеет постоянную длину (т.е. поле является круго-

вым), то в любой момент времени он может быть определен по двум мгновенным значениям потокосцеплений двух фаз (имеется в виду трехфазная обмотка):

$$\Psi_{рез} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\Psi_j^2 + \Psi_j \Psi_k + \Psi_k^2},$$

где индексы  $j$  и  $k$  могут соответствовать любым двум из трех фаз (например,  $AX$  и  $BY$  или  $BY$  и  $CZ$  и т.д. ).

Этот способ удобен тем, что амплитуда результирующего вектора потокосцепления (и, следовательно, амплитуда потокосцепления фазы) может быть определена при любом положении ротора относительно статора. Заметим, что для рассматриваемого момента времени, когда ось полюса ротора ориентирована вдоль магнитной оси фазы  $AX$ , мы должны получить результат, близкий к полученному по всем рассмотренным ранее способам. Действительно, определив потокосцепление фазы  $BY$  так же, как мы определили его для фазы  $AX$ , получим:

$$\begin{aligned} \Psi_{рез} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\Psi_{AX}^2 + \Psi_{AX} \Psi_{BY} + \Psi_{BY}^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{281,5^2 + 281,5 \cdot (-126,5) + (-126,5)^2} \cdot 10^{-6} = \\ &= 281,9 \cdot 10^{-6} \text{ Вб / мм} \end{aligned}$$

Здесь следует заметить, что даже значительная ошибка при определении потокосцепления  $BY$  при данном положении ротора не приводит к заметному отличию  $\Psi_{рез}$  от  $\Psi_{AX}^I$ .

Итак, мы рассмотрели несколько способов определения потокосцепления фазы трехфазной обмотки. В рассмотренном случае они дали практически совпадающие результаты. Напомним, однако, условия, при которых проводилось сравнение: моделировался режим холостого хода (отсутствие токов в пазах и, следовательно, отсутствие потоков пазового рассеяния и отсутствие насыщения стали). Моделирование при иных условиях позволит оценить влияние и рассеяния, и насыщения стали на точность каждого из рассмотренных способов.

Если известны обмоточные данные машины, рассчитанная тем или иным способом амплитуда потокосцепления фазы позволяет найти ЭДС обмотки.

### **Программа работы.**

1. Ознакомиться с методической частью работы. Используя данные машины, приведенные в начале описания работы, рассчитать ЭДС холостого хода при номинальной частоте вращения.

2. В соответствии с заданным вариантом сформировать конечно-элементную модель машины. Описать основные параметры модели (общее число узлов, распределение плотности узлов по поперечному сечению машины и т.п.), объяснить их выбор.

3. Смоделировать режим холостого хода при условии, что ось полюса ротора совпадает с магнитной осью одной из фаз обмотки статора. Относительную магнитную проницаемость стали задать равной 10000. Проанализировать распределение поля. Найти потокосцепление одной из фаз обмотки всеми рассмотренными способами. Рассчитать ЭДС фазы при номинальной частоте вращения.

4. Повторить моделирование режима холостого хода (п.3) при задании реальной кривой намагничивания стали статора. Оценить влияние насыщения на результаты моделирования.

5. Повторить моделирование режима холостого хода при произвольном положении ротора.

6. Сделать выводы по работе и оформить отчет.

Таблица вариантов

| Номер варианта | 1    | 2    | 3   | 4   | 5   |
|----------------|------|------|-----|-----|-----|
| $D_i$ , мм     | 110  | 110  | 145 | 197 | 158 |
| $D_a$ , мм     | 191  | 191  | 225 | 272 | 225 |
| $Z_1$          | 24   | 24   | 36  | 54  | 54  |
| $b_1$ , мм     | 12,6 | 12,6 | 9,2 | 8,2 | 6,6 |

|                                |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|
| $b_2$ , мм                     | 10,5 | 10,5 | 6,1  | 6,1  | 4,8  |
| $h_{\text{кл}}$ , мм           | 2,0  | 2,0  | 2,0  | 2,5  | 2,0  |
| $b_{\text{ш}}$ , мм            | 3,0  | 3,0  | 3,7  | 3,7  | 3,5  |
| $h_{\text{ш}}$ , мм            | 0,5  | 0,5  | 0,9  | 1,0  | 0,9  |
| $h_{\text{паза}}$ , мм         | 15,1 | 15,1 | 17,8 | 24,7 | 16,0 |
| $p$                            | 2    | 2    | 2    | 3    | 3    |
| $a$                            | 1    | 2    | 1    | 3    | 1    |
| $l_1$ , мм                     | 60   | 60   | 160  | 145  | 160  |
| $H_{\text{магн}}$ , мм         | 4    | 5    | 6    | 7    | 5    |
| $\alpha_{\text{магн}}$ , град. | 80   | 80   | 75   | 48   | 48   |
| $\delta$ , мм                  | 0,6  | 1,0  | 0,6  | 0,8  | 0,5  |
| $w_{\text{к}}$                 | 26   | 20   | 22   | 46   | 15   |
| $n$ , об/мин                   | 1500 | 1500 | 1500 | 1000 | 1000 |
|                                |      |      |      |      |      |

В таблице обозначено:

$D_i$  – диаметр расточки статора

$D_a$  – внешний диаметр ярма статора

$Z_1$  – число пазов статора

$b_1$  – ширина паза по дну

$b_2$  – ширина паза над клиновой частью

$b_{\text{ш}}$  – раскрытие паза

$h_{\text{кл}}$  – высота клиновой части паза

$h_{\text{паза}}$  – полная глубина паза (высота зубца)

$p$  – число пар полюсов

$a$  – число параллельных ветвей обмотки

$l_1$  – длина активной зоны

$H_{\text{магн}}$  – радиальная толщина магнитов

$\alpha_{\text{магн}}$  – угловая ширина магнитов (в электрических градусах)

$\delta$  – немагнитный зазор между внешней поверхностью магнитов и

внутренней поверхностью статора

$w_k$  – число эффективных витков в катушке

$n$  – частота вращения

Обмотка статора во всех вариантах однослойная.

### **Контрольные вопросы.**

1. Что такое потокосцепление обмотки?
2. Какие способы определения потокосцепления фазы с помощью конечно-элементной модели Вы знаете?
3. Как влияет насыщение стали на точность рассмотренных в работе методов определения потокосцепления фазы обмотки?