

**Моделирование установившегося режима работы синхронного генератора на конечно-элементной модели.**

В этой работе по результатам моделирования магнитостатического поля определяются величины, характеризующие работу синхронного генератора в установившемся режиме: напряжение на зажимах якорной обмотки, ток, мощность, коэффициент мощности, электромагнитный момент. При формировании модели предполагаются известными: все размеры поперечного сечения, схема обмотки, коэффициент заполнения медью пазов статора и поперечного сечения обмотки возбуждения (при электромагнитном возбуждении), свойства материалов, составляющих магнитную цепь (кривые намагничивания стали статора и ротора, коэрцитивная сила и относительная магнитная проницаемость постоянных магнитов (для магнитоэлектрических машин)). Для воспроизведения магнитного поля в конкретный момент времени в модели требуется задать также мгновенные значения плотности тока на участках модели, соответствующих пазам статора и обмотке ротора при электромагнитном возбуждении, и взаимное положение сердечников статора и ротора.

Если не ставится задача учесть пульсации момента, связанные с зубчатостью сердечников, удобно для моделирования выбрать момент времени, в который ток в фазе  $AХ$  равен максимальному значению, а в фазах  $ВУ$  и  $СZ$  по величине вдвое меньше, а по знаку противоположны (ограничимся пока рассмотрением симметричных режимов работы трехфазных синхронных машин). Для определения взаимного положения статора и ротора требуется рассмотреть соотношения между углами векторной диаграммы и пространственными углами конечно-элементной модели.

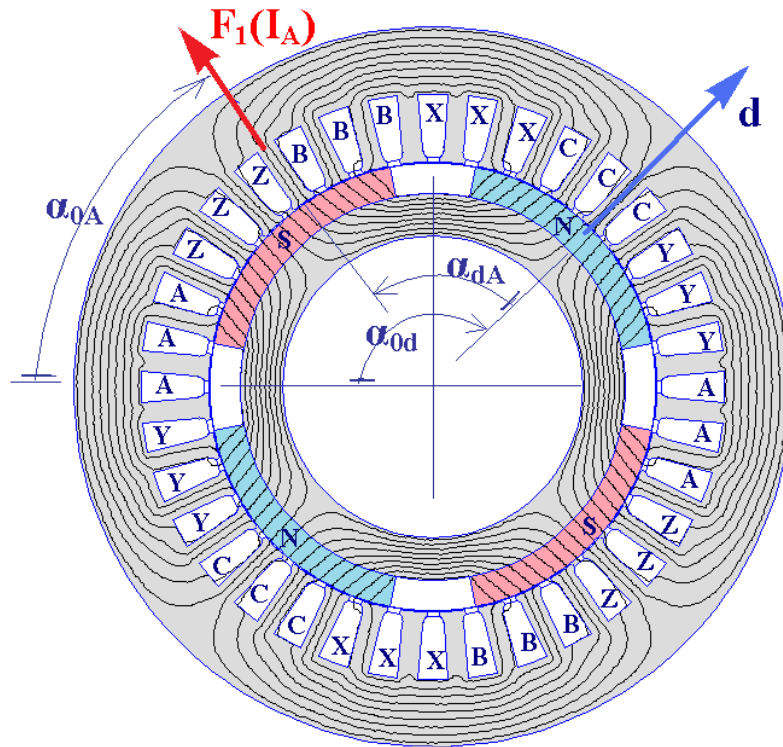


Рис. 1. Картина поля в поперечном сечении четырехполюсного магнитоэлектрического генератора при холостом ходе. Показано также положение магнитной оси обмотки якоря, которое она заняла бы в момент времени, когда ток в фазе  $AX$  равен максимальному

Прежде всего, отметим, что углы между векторами диаграммы отсчитываются *против часовой стрелки* и выражаются в *электрических* градусах. Пространственные углы на модели будем отсчитывать *в направлении вращения поля* (напомним, что при заданной на модели схеме обмотки направление вращения поля определяет последовательность  $AZBXCY$ . Обычно схема обмотки на модели задается так, что эта последовательность направлена слева направо, т.е. *по часовой стрелке*).

Затем важно подчеркнуть, что аргумент комплекса тока на диаграмме (или, другими словами, угол вектора тока обмотки) соответствует пространственному углу, определяющему положение магнитной оси обмотки в рассматриваемый момент времени. При указанном выше соотношении между мгновенными значениями плотности тока фаз, заданном на модели ( $i_A = I_m$ ,  $i_B = i_C = -(1/2)I_m$ ) магнитная ось обмотки совпадает с магнитной осью фазы

$A_X$ , т.е. при известной схеме обмотки (при известном распределении катушечных сторон фаз по пазам) положение магнитной оси обмотки в пространстве модели можно определить еще на стадии формирования модели. В более сложных случаях для того, чтобы определить положение магнитной оси обмотки, следует смоделировать ее поле (заменив зубчатый или явнополюсный ротор цилиндрическим) и произвести гармонический анализ распределения индукции в воздушном зазоре.

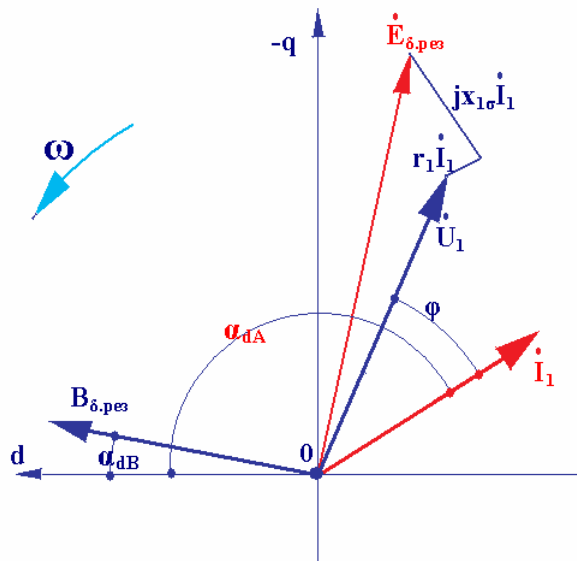
Продольной осью  $d$  машины будем считать ось ближайшего к магнитной оси обмотки северного полюса ротора. Северным назовем полюс, поток которого направлен от ротора к статору. В генераторном режиме работы ведущий северный полюс опережает магнитную ось обмотки, при работе двигателем – отстает от нее.

После того, как магнитное поле смоделировано, следует выполнить гармонический анализ распределения индукции в воздушном зазоре (с помощью встроенной функции *MathCAD*'а *fft*) и определить положение магнитной оси результирующего поля на модели, в качестве которой будем рассматривать ось ближайшей (к оси обмотки) положительной полуволны основной гармоники индукции. Эта ось определяет положение вектора индукции на векторной диаграмме.

Вектор результирующей ЭДС на диаграмме отстает от вектора индукции на  $90$  градусов (электрических). Таким образом, положение вектора результирующей ЭДС оказывается определенным относительно оси  $d$  и относительно вектора тока (напомним, что угол  $\alpha_{dA}$ , определяющий положение ротора относительно магнитной оси обмотки, задается при формировании модели). Зная параметры машины, – индуктивное сопротивление рассеяния и активное сопротивление фазы обмотки, – можно построить векторы соответствующих падений напряжения  $jx_{\sigma}I$  и  $rI$  и сам вектор напряжения на зажимах обмотки  $U$ . Таким образом, определенным оказывается угол  $\varphi$  между векторами напряжения и тока и может быть рассчитана мощность машины. В том случае, если параметры режима работы не совпадают с требуемыми, коррек-

тируются исходные данные численного эксперимента: ток обмотки возбуждения (если моделируется машина с электромагнитным возбуждением) и/или угловое положение ротора.

Таким же образом могут быть выполнены серии численных экспериментов, по результатам которых могут быть построены характеристики машины.



**Рис. 2. Векторная диаграмма установившегося режима работы синхронного генератора при активно-индуктивной нагрузке**

В том случае, если активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря относительно невелики, как это часто можно принять, не делая большой ошибки, для крупных машин, по картине поля в поперечном сечении можно приближенно определить угол нагрузки  $\Theta$ , поскольку он оказывается примерно равным углу между осью  $d$  и магнитной осью результирующего поля. Рис. 3 поясняет сказанное на примере картины поля явнополюсного генератора средней мощности.

При выполнении работы необходимо применить гармонический анализ распределения индукции в воздушном зазоре. Рекомендуется для этой цели использовать встроенную функцию пакета *MathCAD*, осуществляющую разложение периодической зависимости в ряд Фурье (*fft*) (см. рис 4).

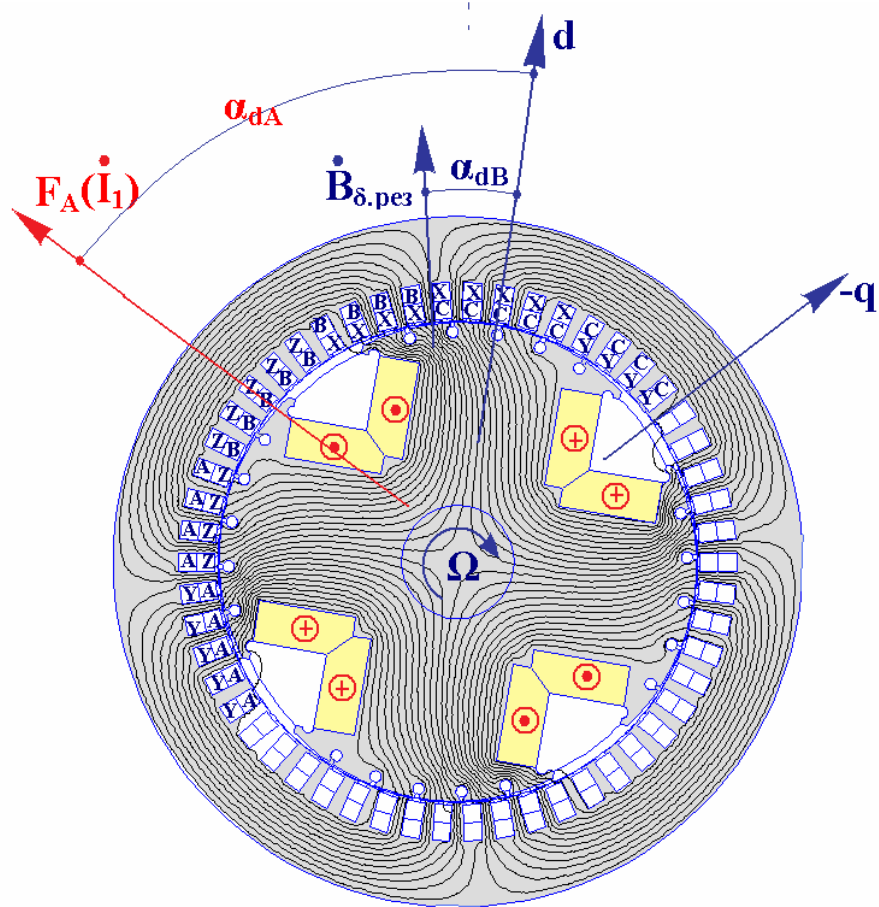


Рис. 3. Картина поля в поперечном сечении четырехполюсного явнополюсного синхронного генератора в установившемся режиме работы при активно-индуктивной нагрузке. Угол  $\alpha_{dB}$ , выраженный в электрических градусах, примерно равен углу нагрузки  $\Theta$

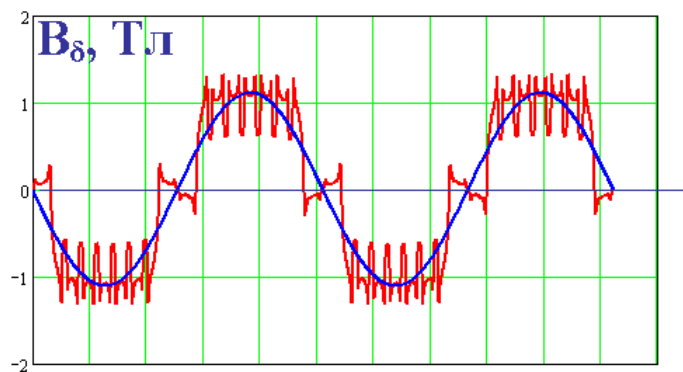


Рис. 4. Распределение индукции в воздушном зазоре четырехполюсного магнитоэлектрического генератора, поперечное сечение которого показано на рис. 1. Показана основная гармоника распределения, найденная в результате гармонического анализа.

### Программа работы.

1. На базе заданного типоразмера асинхронного двигателя серии 4А (см. таблицу) сформировать модель поперечного сечения магнитоэлектрического генератора (Справочник по двигателям серии 4А размещен на сайте кафедры ЭМ). Для ротора генератора задать: толщину поверхностных дуговых магнитов, равной 0,07 диаметра, угловую ширину магнитов, равную 0,75 полюсного деления, материал магнитов выбрать из библиотеки материалов программы *FEMM*, толщину втулки ротора, на которой размещены магниты, такой, чтобы при холостом ходе максимальная индукция в ней не превышала 1,6 Тл.
2. Смоделировать режим холостого хода генератора, выполнить гармонический анализ распределения индукции в воздушном зазоре, определить число витков в фазах обмотки якоря, при котором фазная ЭДС близка к номинальному напряжению асинхронного двигателя, заданному для выбранного типоразмера асинхронного двигателя.
3. Задавшись рядом значений угла  $\alpha_{dA}$ , найти мощность генератора при условии, что плотность тока в пазах статора (среднее по сечению паза значение) соответствует номинальной плотности тока асинхронного двигателя, указанной в Справочнике. Активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря принять равными значениям, указанным в Справочнике. Построить векторные диаграммы для трех-пяти значений угла  $\alpha_{dA}$ .
4. Оформить отчет о работе и подготовить презентацию.

Вариант	Типоразмер двигателя	Мощность
1	4A100L4Y3	4,0 кВт
2	4A112M4Y3	5,5 кВт
3	4A132M4Y3	11,0 кВт
4	4A160M4Y3	18,5 кВт
5	4A132M6Y3	7,5 кВт
6	4A160S6Y3	11,0 кВт
7	4A180M6Y3	18,5 кВт