

Определение обмоточных коэффициентов на конечно-элементных моделях

Как известно, обмоточный коэффициент ν -й гармонической k_{ov} входит в выражение для ЭДС и учитывает распределение обмотки по пазам и укорочение шага обмотки.

$$E_\nu = \pi\sqrt{2}fwk_{ov}\left(\frac{2}{\pi}B_\nu\right)\tau_\nu l_\delta \quad (1)$$

$$k_{ov} = k_{pv}k_{yv} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\nu\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{2mq}\nu\right)} \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta\nu\right) \quad (2)$$

где q - число пазов на полюс и фазу; β – относительный шаг обмотки; τ_ν - полюсное деление ν -й гармоники, f - частота w - число последовательных витков фазы; m - число фаз.

Вычисление ЭДС по известной амплитуде B_ν индукции в зазоре с помощью только этих коэффициентов предполагает: 1) весь поток ν -й гармонической является потоком взаимоиндукции; 2) свойства стали сердечника, на котором расположена обмотка, не влияют на распределение поля ν -й гармонической за границами зазора и потокосцепление обмотки может быть вычислено в предположении, что магнитная проницаемость стали равна бесконечности; 3) раскрытия пазов бесконечно малы; 4) зазор в сравнении с полюсным делением мал и затухание поля ν -й гармонической в зазоре отсутствует.

Обмоточный коэффициент входит также в выражение для амплитуды МДС ν -й гармонической:

$$F_{\nu m} = \frac{m\sqrt{2}Iwk_{ov}}{\pi\nu p}, \quad (3)$$

где I – действующее значение тока фазы, p – число пар полюсов машины.

Если поле в зазоре создается МДС F_{vm} при перечисленных выше условиях, то пространственное распределение индукции повторяет пространственное распределение МДС.

В соответствии с выражениями (1) и (3) обмоточные коэффициенты k_{ov} , k_{pv} и k_{yv} могут быть определены по двум различным полевым моделям.

Описать эти модели можно следующим образом. Область поля в обоих случаях представляет собой узкую длинную прямоугольную полосу с размерами $\delta \cdot 2\tau$, где δ - воздушный зазор, τ - полюсное деление основной гармоники. На верхней и нижней границах области для векторного магнитного потенциала следует задать условия Неймана, на боковых границах – периодические условия.

Для первой модели (определение k_{ov} по (1)) вблизи нижней границы формируется тонкий токовый слой, воспроизводящий гармоническое возбуждение нижнего сердечника. Как показывает опыт, для воспроизведения синусоидального распределения индукции в зазоре период гармоники достаточно (и удобно) разбить на сравнительно небольшое (18 или 24) число участков с постоянной плотностью тока на каждом. Можно также задать гармоническое возбуждение сердечника на гораздо большем числе участков, воспользовавшись средствами программирования (для пакета *FEMM* – на языке *Lua*). Обмотка, для которой определяется обмоточный коэффициент, воспроизводится на модели точками, соответствующими сечениям бесконечно тонких катушечных сторон. Располагаются точки на верхней границе (на поверхности верхнего сердечника) на осях пазов. Потокосцепления и ЭДС катушек и всей обмотки находятся по значениям векторных потенциалов в этих точках.

На второй модели (определение k_{ov} по (3)) обмотка задается так же, как на первой – точками, соответствующими сечениям катушечных сторон, но в этом случае в точках задаются значения соответствующих токов. Нижний сердечник не возбужден. Поскольку обмоточный коэффициент на второй модели находится как отношение амплитуды v -й гармоники индукции поля, со-

зданного обмоткой с заданным распределением и укорочением шага, к амплитуде ν -й гармоники индукции поля сосредоточенной обмотки, на второй модели необходимо смоделировать также и обмотку с $q = 1$ (при диаметральном шаге) и для обоих случаев выполнить гармонический анализ поля в зазоре.

Определение обмоточного коэффициента с помощью двух описанных моделей, в наибольшей мере удовлетворяющих допущениям, принятым при выводе аналитических выражений для $k_{p\nu}$ и $k_{y\nu}$, приводит, естественно, к результатам, практически совпадающим с расчетом по этим выражениям.

Несмотря на то, что при определении обмоточных коэффициентов по второй модели приходится моделировать две обмотки (одна из них - сосредоточенная, с диаметральным шагом), второй способ более удобен, поскольку по результатам одного численного эксперимента позволяет найти обмоточные коэффициенты для всех гармоник.

Важно подчеркнуть, что обе модели вполне универсальны в том смысле, что с их помощью может быть найден обмоточный коэффициент любой обмотки, выполненной по любой схеме, с любым распределением эффективных проводников по катушкам.

В качестве примера приведем результаты определения обмоточных коэффициентов на модели второго типа для основной и пятой гармоник обмотки с $q = 3$. Вначале рассмотрим обмотку с диаметральным шагом, а потом - при укорочении шага на два зубцовых деления ($\beta = y/\tau = 7/9 = 0,778$)

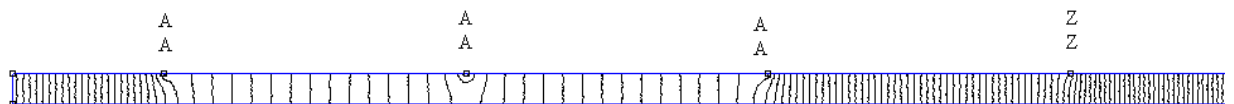


Рис. 1. Фрагмент модели (первые 4 зубцовых деления из 18). Каждый паз представлен двумя линейными токами, расположенными на его оси. Расстояние между токами – 0,05 мм, зазор – 2 мм, период поля – 360 мм.

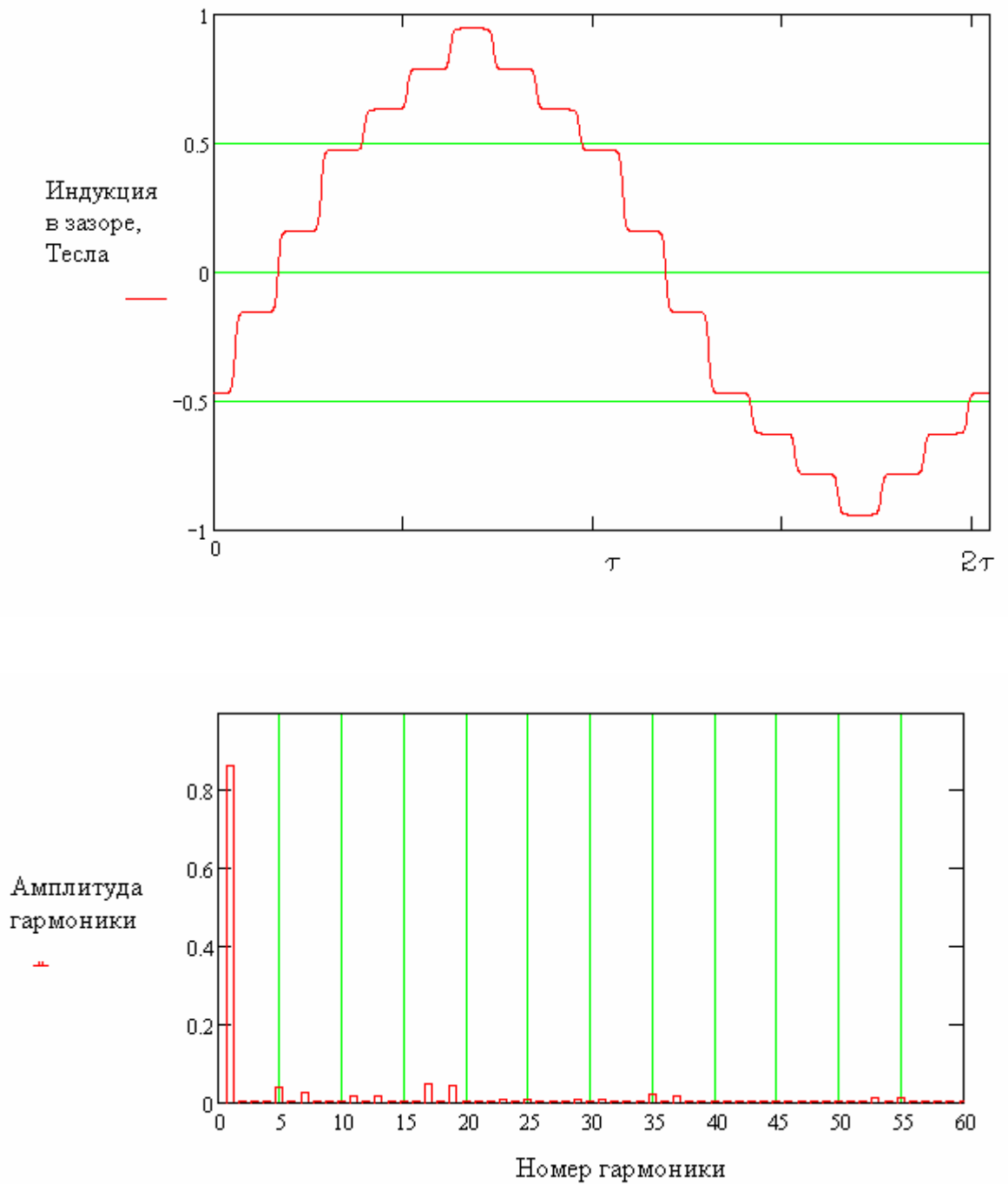


Рис. 2. Распределение индукции и гармонический состав поля в воздушном зазоре, созданного обмоткой с $q = 3$ при диаметральной шаге.

В модели, показанной на рис. 1, каждый паз, в котором находятся катушечные стороны двухслойной обмотки, представлен двумя линейными («точечными») токами, вынесенными на поверхность сердечника и распо-

женными достаточно близко один к другому. Такое представление обмотки удобно при оценке влияния укорочения шага – в этом случае достаточно, выделив все токи нижнего слоя, переместить их (с помощью опции *move*) на необходимое число пазовых делений вправо или влево. Однако обмотка может быть представлена и одним слоем линейных токов – при этом каждый из них должен быть равен суммарному току паза (напомним, что при укороченной обмотке в пазу могут находиться катушечные стороны разных фаз).

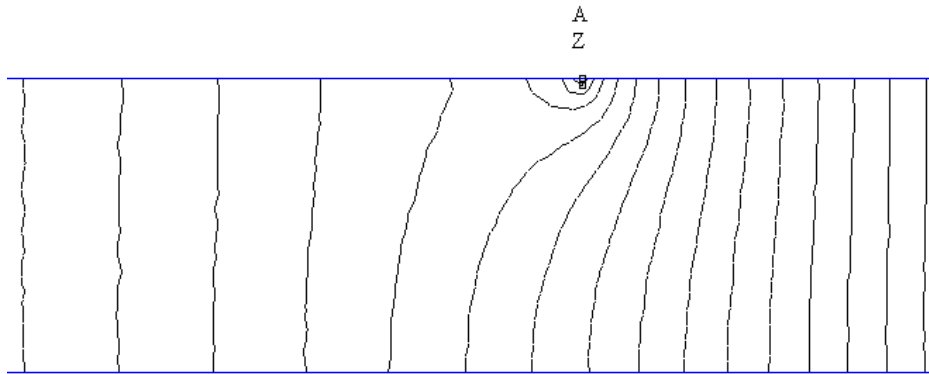


Рис. 3. Фрагмент модели (второе пазовое деление) и картина поля в зазоре, созданного обмоткой с укорочением шага на два зубцовых деления.

Обмоточные коэффициенты для каждой гармоники вычисляются как отношение амплитуды этой гармоники, найденной в результате гармонического анализа поля, созданного в воздушном зазоре исследуемой обмоткой с заданными q и β , к амплитуде основной гармоники поля, созданного сосредоточенной обмоткой с диаметральной шагом ($q = 1$ и $\beta = 1$). Моделировать поля обеих обмоток следует при одном и том же значении фазного тока. Данные для гармонического анализа могут быть получены с помощью записи в текстовый файл определенного (достаточно большого) числа значений индукции на отрезке, длина которого равна периоду основной гармоники. В качестве такого отрезка удобно выбрать нижнюю границу модели, причем начало отрезка должно быть на пересечении с левой боковой границей. Для

гармонического анализа может быть использована встроенная функция *fft* (*Fast Fourier Transform* – быстрое преобразование Фурье), содержащаяся в пакете *MathCAD* (число считанных значений индукции при этом должно быть равно n -й степени двух, удобно выбрать $n = 11$)

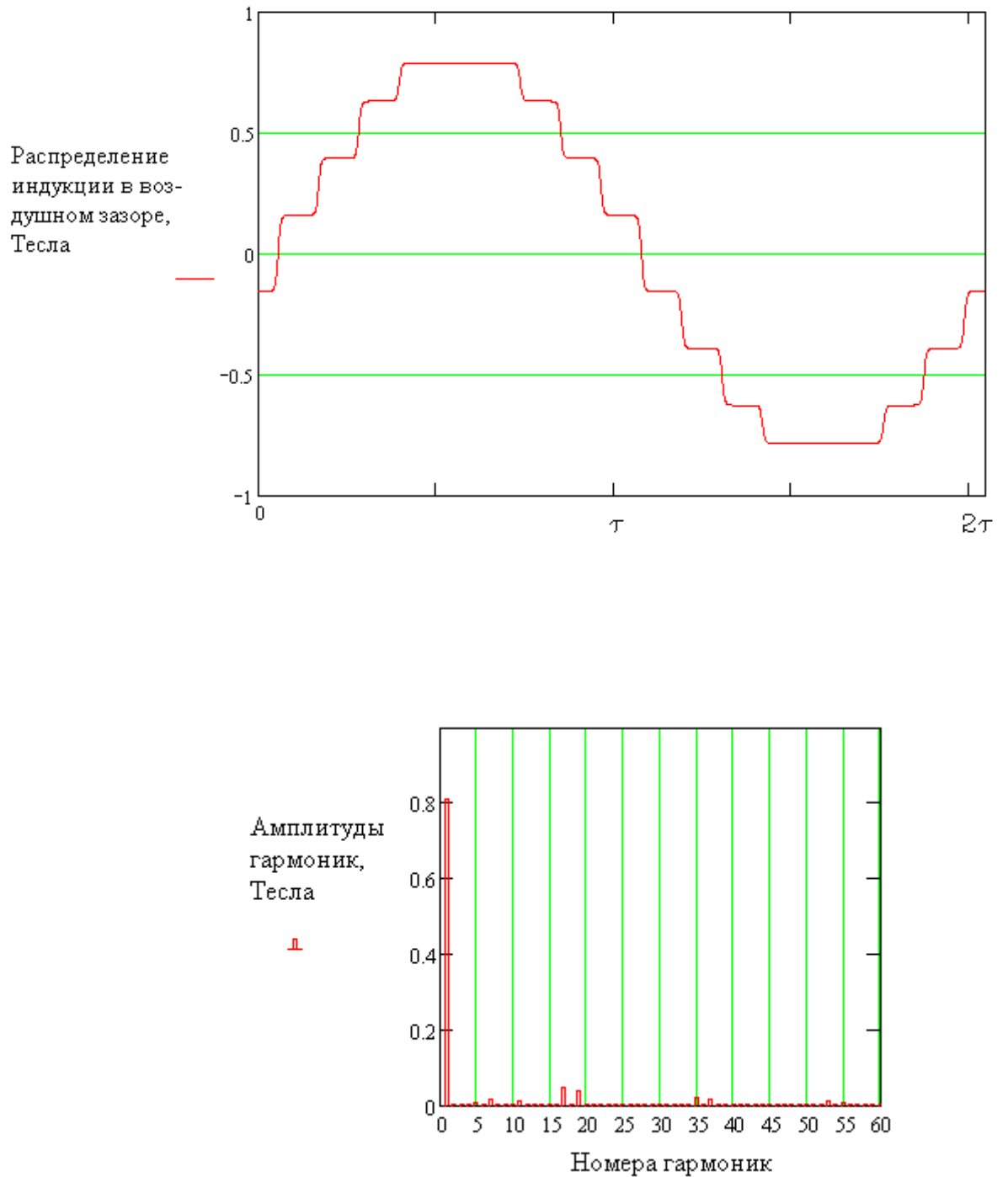


Рис. 4. Распределение индукции и гармонический состав поля в воздушном зазоре, созданного обмоткой с укорочением шага на два зубцовых деления.

Результаты гармонического анализа для рассматриваемой обмотки:

	$q = 3$	$q = 3$	$q = 1$
	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,778$	$\beta = 1,0$
первая гармоника	= 0.86355	= 0.81137	= 0.89968
третья гармоника	= 0.0003	= 0.0003	= 0.00044
пятая гармоника	= 0.03909	= 0.00686	= 0.17922
седьмая гармоника	= 0.02249	= 0.01726	= 0.12716
одиннадцатая гармоника	= 0.01425	= 0.01089	= 0.07997
тринадцатая гармоника	= 0.01443	= 0.00245	= 0.06677
семнадцатая гармоника	= 0.04803	= 0.04523	= 0.05008
девятнадцатая гармоника	= 0.04221	= 0.03956	= 0.04393
23-я гармоника	= 0.00778	= 0.00142	= 0.03534
25-я гармоника	= 0.00556	= 0.00429	= 0.03167
47-я гармоника	= 0.00231	= 0.00175	= 0.01273
49-я гармоника	= 0.00247	= 0.0004	= 0.01164

Программа работы (выполняются пункты, указанные преподавателем).

1. Для заданной схемы обмотки (см. таблицу) сформировать конечно-элементную модель второго типа. Токи в фазах обмотки подобрать такими, чтобы амплитуда основной гармоники индукции в зазоре равнялась 0,8 – 0,9 Тл.

2. По результатам гармонического анализа и по известным аналитическим выражениям определить обмоточные коэффициенты для заданных номеров гармоник. Оценить точность моделирования. Оценить влияние дискретности конечно-элементной структуры на точность моделирования.

3. Сформировать конечно-элементную модель, на которой была бы воспроизведена конфигурация зубчатого сердечника. Относительную маг-

нитную проницаемость стали сердечника вначале задать равной 10000. Раскрытия пазов (ширину шлицев) задать достаточно малыми ($1/5 - 1/10$ зазора), глубину шлицев – в 2-3 раза больше их ширины. Ширину зубцов задать равной примерно половине зубцового деления, ширину ярма – такой, чтобы максимальная индукция в ярме была примерно равной максимальной индукции в зубцах. Значения пазовых токов сохранить. Смоделировать поле в зазоре и выполнить гармонический анализ. Сравнить результаты с полученными в предыдущем пункте.

4. Повторить численный эксперимент при задании реальных свойств стали сердечника (кривую намагничивания взять в руководстве по проектированию электрических машин). По данным эксперимента вычислить коэффициент насыщения зубцовой зоны. Рассчитать амплитуды гармоник индукции в зазоре с учетом насыщения стали, пользуясь полученным значением коэффициента насыщения зубцовой зоны. Сравнить расчетные результаты с полученными при конечно-элементном моделировании.

Вариант		1	2	3	4	5	6	7
Число фаз	m_{ph}	3	3	3	3	3	3	3
Число пар полюсов	P	1	2	3	4	1	1	1
Число зубцов	Z	12	36	36	72	36	48	54
Шаг обмотки по пазам	y	5	7	5	7	15	18	22
Диаметр расточки, мм	D_i	100	200	200	600	600	800	1000
Зазор, мм	δ	0,5	1,0	1,0	2,0	40	60	80