

**Лабораторная работа №4****Определение коэффициентов формы поля по продольной оси  $k_d$  и по поперечной оси  $k_q$  на конечно-элементных моделях**

При нагрузке обмотка якоря синхронной машины создает собственное магнитное поле, которое называется полем реакции якоря. Реакция якоря синхронной машины оказывает значительное влияние на характеристики и поведение синхронной машины как при установившихся, так и при переходных режимах работы.

В том случае, если фазовый угол между током обмотки якоря  $I_1$  и ЭДС  $E_f$ , наведенной в ней потоком возбуждения (в предположении, что других потоков в машине нет) равен нулю или  $\pm \pi/2$ , МДС обмотки якоря оказывается направленной по поперечной оси  $q$  или по продольной оси  $d$ . Соответственно говорят о поперечной и продольной реакциях якоря. Напомним, что продольная реакция якоря может быть размагничивающей, если ток  $I_1$  отстает по фазе от ЭДС  $E_f$ , и намагничивающей, если  $I_1$  опережает  $E_f$ . Во всех этих трех случаях поле в поперечном сечении машины является симметричным относительно осей  $d$  и  $q$ . Это означает, что для ненасыщенной машины, магнитная система которой линейна, режим работы при любой нагрузке (при любом  $\cos\varphi$ ) может быть представлен как суперпозиция двух симметричных режимов – при поперечной и при продольной составляющих тока якоря.

Такой метод анализа работы синхронной машины впервые был предложен французским электротехником А. Блонделем в 1895 г. и называется методом или теорией двух реакций.

В лабораторной работе по результатам моделирования поля в поперечном сечении явнополюсной синхронной машины на конечно-элементной модели определяются коэффициенты формы поля по продольной оси  $k_d$  и по поперечной оси  $k_q$ . С помощью этих коэффициентов определяются индук-

тивные параметры по обеим осям, входящие в уравнения электрических цепей машины.

Продольное и поперечное поля якоря создаются продольным  $I_d$  и поперечным  $I_q$  токами якоря. Для того чтобы задать на модели токи  $I_d$  и  $I_q$ , следует вспомнить, что МДС  $F_d$  и  $F_q$ , создаваемые этими токами, направлены соответственно по продольной оси машины (т.е. вдоль осей полюсов) и по ее поперечной оси (т.е. по осям межполюсных промежутков).

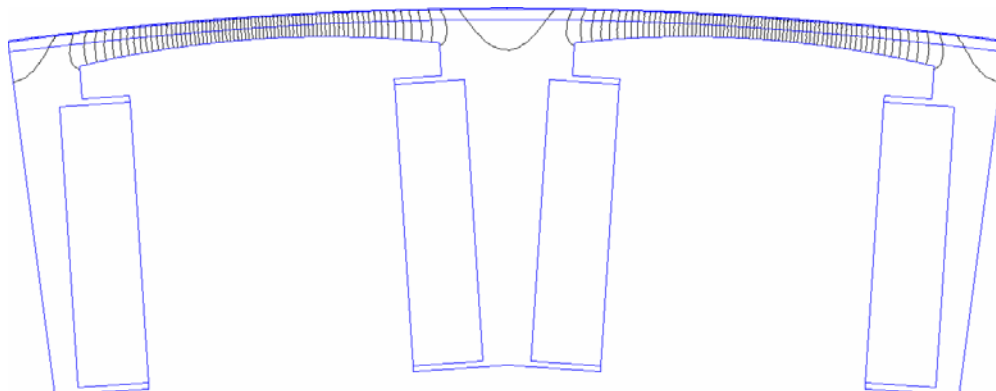
По определению коэффициенты формы поля по продольной и поперечной осям равны отношениям амплитуд основных гармонических составляющих  $B_{adm1}$  и  $B_{aqm1}$  к амплитудам индукции  $B_{adm}$  и  $B_{aqm}$ , найденным при действии тех же МДС  $F_d$  и  $F_q$ , но при равномерном, приведенном с учетом зубчатости, воздушном зазоре  $\delta'$ . При моделировании ненасыщенной машины для воспроизведения и продольного, и поперечного полей можно задавать одну и ту же гармоническую МДС, причем в первом случае ориентировать ее следует вдоль оси  $d$ , во втором – вдоль оси  $q$ . Удобство такого подхода состоит в том, что при равномерном зазоре поле достаточно смоделировать один раз, т.к. в этом случае  $B_{adm} = B_{aqm}$ .

$$k_d = \frac{B_{adm1}}{B_{adm}} \quad (1)$$

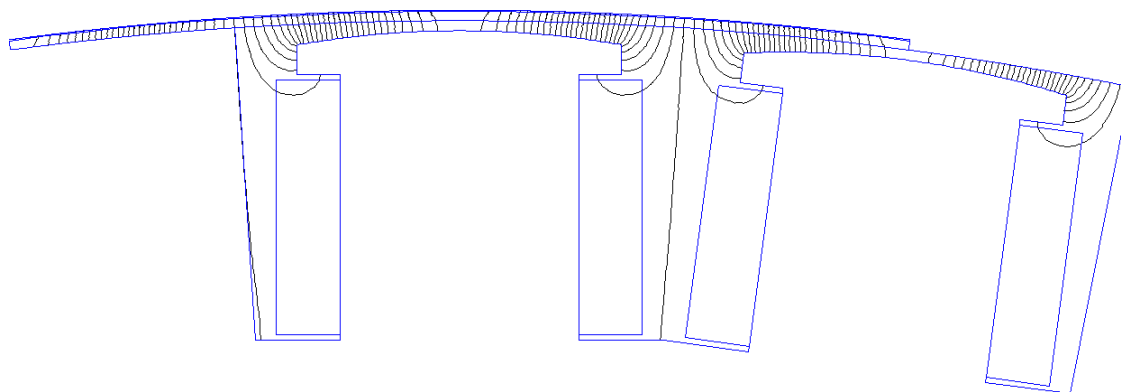
$$k_q = \frac{B_{aqm1}}{B_{aqm}} \quad (2)$$

Поскольку насыщение стали при таком определении коэффициентов  $k_d$  и  $k_q$  не учитывается, магнитопровод машины на конечно-элементных моделях можно не воспроизводить, задав на границах, соответствующих поверхностям сердечников, условия Неймана. Основную гармонику МДС якоря можно воспроизвести, задав у границы, соответствующей внутренней поверхности якоря (статора), тонкий токовый слой, составленный из достаточно большого числа участков с постоянной плотностью тока (как показывает опыт, слой из 24 участков моделирует гармонику МДС с хорошей точностью). На рисунках 1 и 2 приведены картины продольного и поперечного по-

лей якоря, полученные на моделях, построенных в соответствии с этими рекомендациями



**Рис. 1.** Картина продольного поля якоря при задании основной гармоники МДС якоря токовым слоем, состоящим из 24 участков с постоянной плотностью тока на каждом из них. На верхней и нижней границах модели заданы однородные условия Неймана, на боковых границах – периодические условия. Для наглядности и удобства гармонического анализа поле моделируется на периоде основной гармоники.

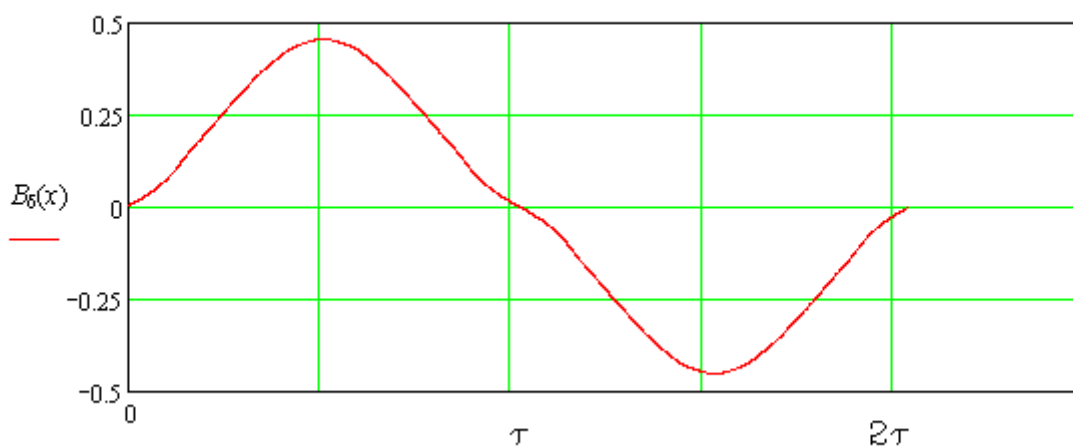


**Рис. 2.** Картина поперечного поля якоря, полученная на той же модели смещением нижней ее части относительно верхней на половину полюсного деления основной гармоники.

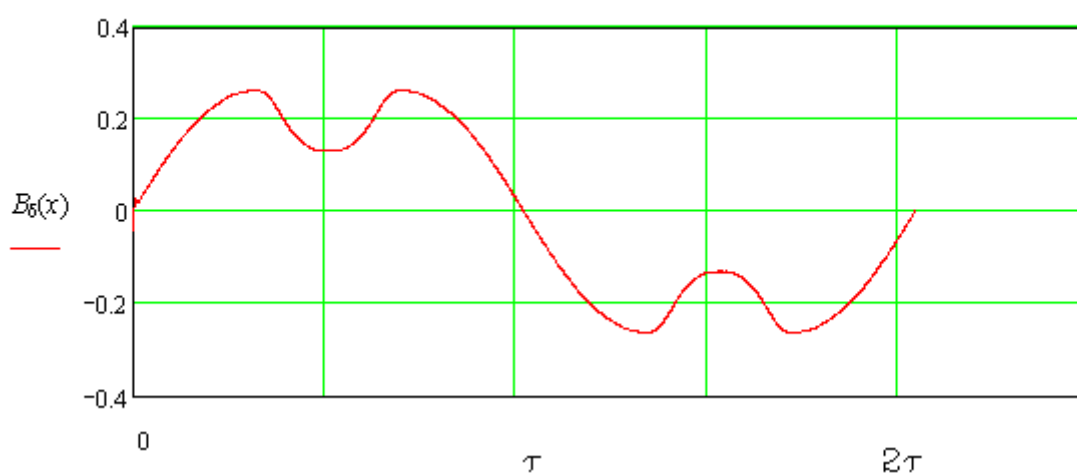
На рис. 2 показано, как картину поперечного поля якоря можно получить на основе модели продольного поля – с этой целью достаточно, сохраняя периодичность условий на боковых границах, переместить нижнюю часть модели относительно верхней на половину полюсного деления. Заме-

тим, что при этом боковые границы трансформируются – на каждой из них появляются дуговые участки.

На рисунках 3 и 4 показаны распределения индукции в воздушном зазоре, полученные на конечно-элементных моделях рис.1 и рис.2. Контурами, на которых снимались распределения индукции, являлись дуги окружности, поведенной через середину высоты минимального зазора (на осях полюсов).



**Рис. 3.** Распределение индукции продольного поля якоря в зазоре.



**Рис.4.** Распределение индукции поперечного поля якоря в зазоре.

Амплитуды основных гармоник продольного  $B_{adm1}$  и  $B_{aqm1}$  можно найти, выполнив гармонический анализ распределений индукции в зазоре, показанные на рисунках 3 и 4.

Так же, с помощью гармонического анализа, можно найти и амплитуду индукции поля, созданного основной гармоникой МДС якоря при равномерном зазоре, равном минимальному, после чего по (1) и (2) можно найти коэффициенты формы поля по продольной и поперечной осям.

В заключение заметим, что модель поперечного поля можно получить, не изменяя конфигурации области. Для этого, на модели продольного поля, достаточно переместить на половину полюсного деления токовый слой. Сделать это можно, применив опцию *move* к обозначениям блоков всех участков токового слоя, воспроизводящего МДС обмотки якоря.

### **Программа работы.**

1. Для данным синхронной машины (см. таблицу) сформировать конечно-элементную модель продольного поля. Амплитуду плотности тока в токовом слое, воспроизводящем МДС якоря, подобрать такой, чтобы наибольшее значение индукции в зазоре равнялась 0,8 – 0,9 Т. Выполнить гармонический анализ поля и найти значение  $B_{adm1}$ .

2. На основе модели п. 1 сформировать модель поперечного поля, сохранив то же значение МДС обмотки якоря. Смоделировать поперечное поле, выполнить гармонический анализ и найти значение  $B_{aqm1}$ .

3. Сформировать модель машины с гладким зазором, равным минимальному, смоделировать поле, созданное той же МДС якоря. Найти коэффициенты формы поля по продольной и поперечной осям.

4. Сравнить полученные результаты со значениями тех же коэффициентов, найденными по таблицам и графикам, приведенным в учебной литературе по электрическим машинам.

| Вариант                             |                 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5     | 6     | 7     |
|-------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Число фаз                           | $m_{ph}$        | 3    | 3    | 3    | 3    | 3     | 3     | 3     |
| Число пар полюсов                   | $P$             | 24   | 40   | 30   | 8    | 36    | 24    | 21    |
| Диаметр расточки статора, м         | $D_i$           | 0,65 | 8,54 | 7,97 | 3,90 | 11,00 | 11,00 | 11,85 |
| Число зубцов на статоре             | $Z$             | 378  | 504  | 396  | 180  | 486   | 504   | 504   |
| Ширина раскрытий пазов статора, мм  | $b_{ш}$         | 22,5 | 26,5 | 25,5 | 26,0 | 27,5  | 26,5  | 29,7  |
| Минимальный зазор (приведенный), мм | $\delta$        | 19,3 | 12,0 | 14,0 | 20,0 | 18,0  | 25,0  | 30,0  |
| Максимальный зазор, мм              | $\delta_m$      | 28,9 | 18,0 | 21,0 | 30,0 | 26,0  | 38,0  | 45,0  |
| Коэффициент полюсного перекрытия    | $\alpha_\delta$ | 0,72 | 0,72 | 0,74 | 0,73 | 0,72  | 0,74  | 0,73  |