

# УЧЁТ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ СИНХРОННЫХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Леонид ЯЗЛОВЕЦКИ, Мария ЯЗЛОВЕЦКИ

Технический Университет Молдовы

**Аннотация:** В статье приведены два метода учёта реакции якоря синхронного двигателя с постоянными магнитами. Первый метод основан на определении магнитной индукции в воздушном зазоре машины под нагрузкой путём перемещения линии возврата на величину магнитодвижущей силы продольной реакции якоря. Метод применим для неявнополюсных машин или машин, у которых разница магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям незначительна. Вторым методом основан на определении коэффициентов формы поля по продольной и поперечной осям с помощью программы FEMM. В дальнейшем учёт реакции якоря по этому методу осуществляется как для обычных явнополюсных машин.

**Ключевые слова:** диаграмма состояния магнита, линия возврата, МДС реакции якоря, метод конечных элементов, синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям.

При проектировании синхронных машин большое значение имеет учёт влияния поля якоря на основное поле машины. Если для машин традиционной конструкции с электромагнитным возбуждением этот вопрос давно и хорошо изучен [1], то для синхронных машин с постоянными магнитами, толчком к развитию которых в последнее время послужило создание высококоэрцитивных магнитов из редкоземельных элементов, этот вопрос находится в постоянном развитии и совершенствовании.

Применение вычислительной техники, создание новых программ расчёта и моделирования задач электромеханики, в свою очередь, побуждает к переработке старых методов ручного счёта, их адаптации к новым условиям и возможностям. При этом всё большее значение приобретают вопросы компьютерного моделирования, на базе которого определяются параметры машины, а по завершению задачи синтеза конструкции могут быть определены характеристики машины в различных режимах работы.

В настоящей статье рассматриваются два метода учёта реакции якоря синхронной машины с постоянными магнитами. Оба метода рассмотрены применительно к синхронным двигателям. Эти же методы, при соответствующей корректировке, могут быть применены и к синхронным генераторам с постоянными магнитами.

Первый метод направлен на определение магнитной индукции в воздушном зазоре синхронного двигателя с постоянными магнитами при работе его под нагрузкой. Сущность этого метода заключается в определении рабочей точки магнита на пересечении характеристики внешней магнитной цепи с линией возврата, смещённой по оси абсцисс на величину МДС продольной реакции якоря. Аналогичные методы применялись и ранее при графоаналитических методах расчёта [2, 3]. Поскольку магнитная проницаемость магнита отличается незначительно от магнитной проницаемости воздуха, то при данной конструкции ротора (см. рис. 1) расчет может быть произведен как для неявнополюсной машины.

Так например расчёт для номинального режима работы заключается в итеративном нахождении вектора тока якоря, соответствующего номинальной нагрузке на валу машины. Расчёт ведётся в следующей последовательности:

- задаётся начальное значение индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$ ;
- определяется абсолютное значение ЭДС фазы по общеизвестной формуле

$$E = 4 \cdot k_B \cdot f \cdot w \cdot k_{ob} \cdot \alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot B_\delta, \quad (1)$$

где:  $k_B$  – коэффициент формы поля возбуждения;  $f$  – частота;  $w$  – число витков фазы обмотки статора;  $k_{ob}$  – обмоточный коэффициент обмотки статора;  $\alpha_\delta$  – расчётный коэффициент полюсного перекрытия;  $\tau$  – полюсное деление;  $l_\delta$  – расчётная длина воздушного зазора.

- задаётся значение угла нагрузки  $\theta$ ;

– определяется вектор тока фазы

$$\underline{I} = \frac{U_n - E \cdot e^{j\Theta}}{r + j \cdot x_s} = I \cdot e^{j\varphi}, \quad (2)$$

где:  $U_n$  – вектор питающего напряжения, начальная фаза которого принята нулевой;  $r$  – активное сопротивление фазы обмотки статора;  $w$  – число витков фазы обмотки статора;  $x_s$  – синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора;  $\varphi$  – фаза вектора тока статора.

– определяется модуль МДС реакции якоря и её продольная составляющая

$$F_a = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w \cdot k_{ob}}{p} \cdot I, \quad (3)$$

где  $m$  – число фаз обмотки статора.

$$F_{ad} = F_a \cdot \sin(\Theta - \varphi) \quad (4)$$

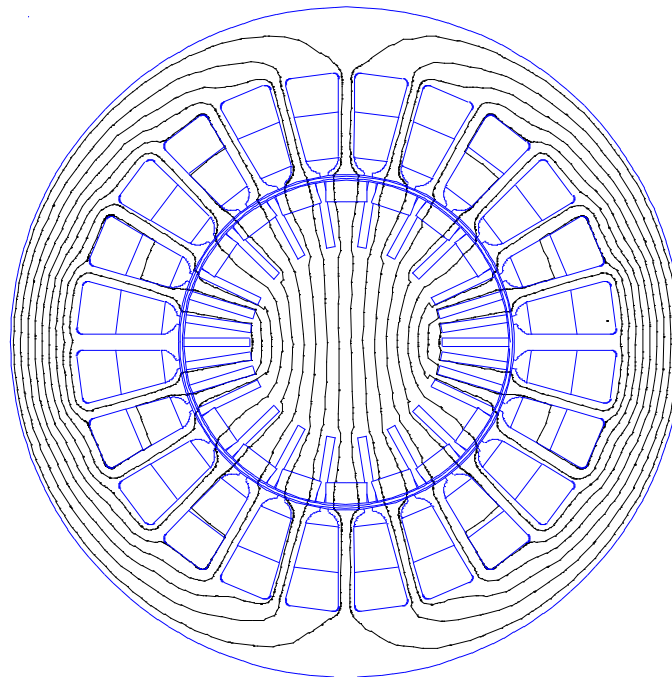


Рис.1. Конструкция магнитопровода электродвигателя насоса АГВ3-22 и поле реакции якоря по продольной оси

- линия возврата перемещается параллельно самой себе на величину  $F_{ad}$ ;
- уточняется значение магнитной индукции  $B_\delta$ ;
- определяется полезная мощность;
- уточняется значение угла нагрузки  $\theta$ .

Диаграмма состояния магнита для такого метода учёта реакции якоря приведена на рис.2.

Вторая методика учёта реакции якоря заключается в определении с помощью FEMM индуктивных сопротивлений реакции якоря по продольной и поперечной осям. Для этого, с помощью программного пакета FEMM, осуществляется моделирование магнитного поля якоря. Распределение магнитного поля якоря для электродвигателя насоса АГВ3-22 по осям “d” и “q” приведено соответственно на рис.3 и рис.4.

После выделения первых гармоник магнитного поля якоря определяются коэффициенты формы поля по продольной  $k_d$  и поперечной  $k_q$  осям. Методика определения коэффициентов  $k_d$  и  $k_q$  с помощью программы Mathcad приведена в [4].

В дальнейшем расчёт ведётся в следующей последовательности:

– определяется индуктивное сопротивление реакции якоря для цилиндрического ротора с расчётным воздушным зазором.

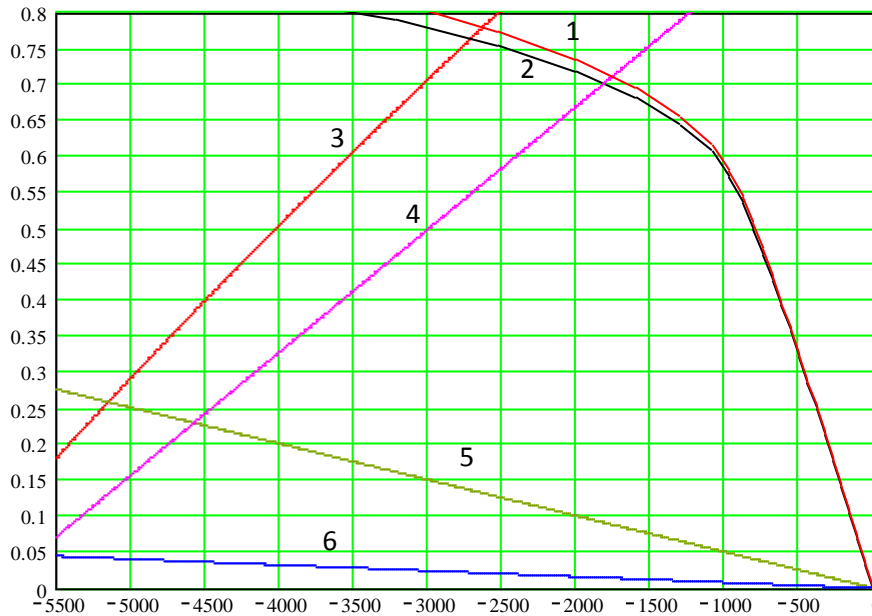


Рис.2. Диаграмма состояния магнита

1- характеристика намагничения внешней магнитной цепи; 2 – индукция в воздушном зазоре; 3 – характеристика размагничивания магнита; 4 – линия возврата, смещённая на величину реакции якоря; 5 – индукция рассеяния магнита в свободном состоянии; 6 - индукция рассеяния магнита в собранном состоянии.

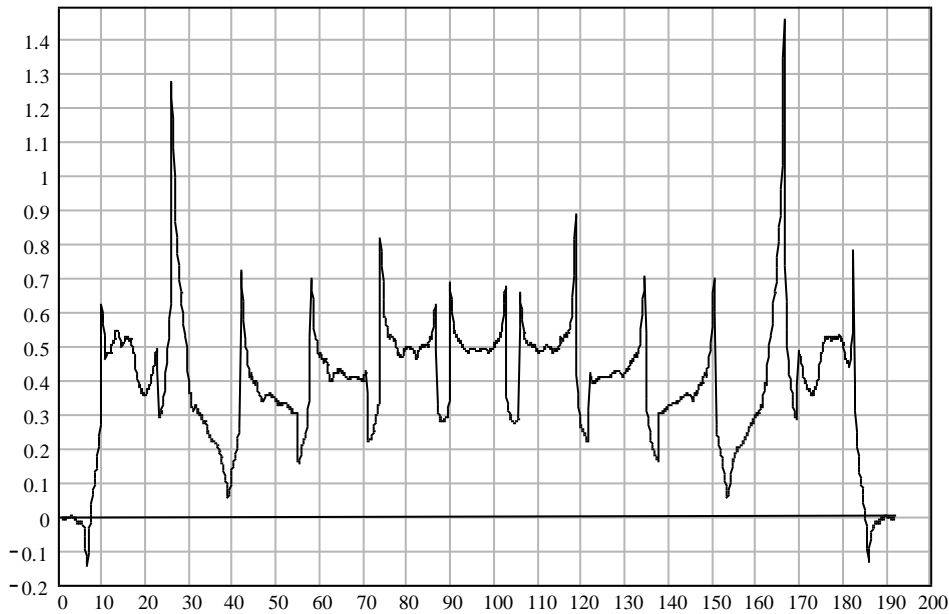


Рис.3. Распределение магнитной индукции поля реакции якоря по продольной оси.

$$x_a = 2 \cdot m \cdot f \cdot D \cdot l_\delta \cdot \frac{w^2 \cdot k_{ob}^2}{p^2} \cdot \frac{B_{\delta 0}}{F_{\Sigma 0}}, \quad (5)$$

где:  $B_{\delta 0}$  – магнитная индукция в воздушном зазоре в режиме холостого хода;  $F_{\Sigma 0}$  – падение магнитного напряжения от потока реакции якоря при цилиндрическом роторе, соответствующее магнитной индукции в воздушном зазоре  $B_{\delta 0}$ .

– определяются синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям машины

$$x_d = x_\sigma + k_d \cdot x_a \quad (6)$$

$$x_q = x_\sigma + k_q \cdot x_a, \quad (7)$$

где  $x_\sigma$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.

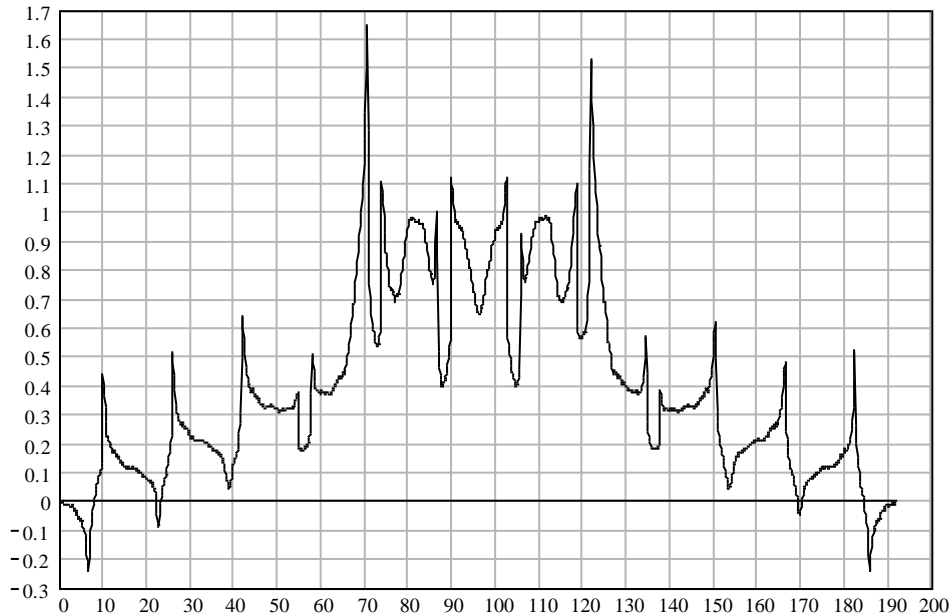


Рис.4. Распределение магнитной индукции поля реакции якоря по поперечной оси.

– определяется ЭДС холостого хода машины

$$E_0 = 4 \cdot k_B \cdot f \cdot w \cdot k_{ob} \cdot \alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot B_{\delta 0} \quad (8)$$

– задаётся значение угла нагрузки  $\theta$ ;

– в соответствии с методикой, изложенной в [5], решается система уравнений электрического равновесия обмотки статора. При выполнении расчетов с помощью программы Mathcad для этого можно воспользоваться стандартной программой Given – Find:

$$\left. \begin{aligned} \text{Given} \\ E_0 - U_n \cdot \sin \beta &= -I \cdot x_d \cdot \cos \alpha - I \cdot r \cdot \sin \alpha \\ U_n \cdot \cos \beta &= I \cdot r \cdot \cos \alpha - I \cdot x_q \cdot \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$I\alpha = \text{Find}(I, \alpha) \quad (10)$$

В приведенных уравнениях:  $\alpha$  – угол между положительным направлением оси “d” и вектором тока  $\underline{I}$ ;  $\beta$  – угол между положительным направлением оси “d” и вектором напряжения  $\underline{U}$ .

В результате решения системы уравнений 9 получается вектор – столбец, первым элементом которого является значение тока;

– определяется полезная мощность;

– целенаправленно изменяется угол нагрузки  $\theta$  для получения необходимой мощности на валу двигателя.

## Литература

1. Копылов И.П. и др. *Проектирование электрических машин*. – М.: Энергия, 1980. 496с..
2. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. *Электрические машины с постоянными магнитами*. – М.– Л.: Энергия, 1964. 480с.
3. Бут Д. А. *Бесконтактные электрические машины*. – М.: Высш.шк., 1990. 416с.

4. Iazlovețchi M., Maftעי V., Iazlovețchi L. *Calculul parametrilor motorului sincron cu magneți permanenți cu ajutorul FEMM*. Conferința Tehnico – Științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților, Chișinău, 2007.
5. Iazlovețchi M., Iazlovețchi L. *Calculul regimului de funcționare al motorului sincron cu magneți permanenți*. Conferința Tehnico – Științifică a colaboratorilor, doctoranzilor și studenților, Chișinău, 2007.