

В.И. МИЛЫХ, д-р техн. наук, **Е.А. СИДОРЕНКО**,
Л.В. ШИЛКОВА (г. Харьков)

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Вирішувється задача підготовки електромагнітних параметрів для розрахунку магнітного поля у різних режимах роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Подається й власне результат самого його розрахунку на основі використання польового підходу та програми FEMM, що розташована на сайті <http://femm.berlios.de>.

The task of preparation of electromagnetic parameters decides for the calculation of the magnetic field in the different modes of operations of asynchronous engine with a short-circuited rotor. The result of his calculation is given actually on the basis of taking field approach and program FEMM, which is located on the site of <http://femm.berlios.de/>.

Основные процессы в электрических машинах (ЭМ) осуществляются через магнитное поле (МП). Поэтому наиболее перспективным путем дальнейшего развития системы их изучения и проектирования является использование именно полевых методов. Современные вычислительная техника, программные средства и пакеты прикладных программ для численных расчетов электромагнитных полей - это готовый универсальный инструмент для расчета электромагнитных параметров ЭМ (магнитных индукций, магнитных потоков и потокосцеплений, падений магнитного напряжения, ЭДС, индуктивностей, сил и моментов и т.д.) с учетом их реальной геометрии и характеристик намагничивания материалов. Задача заключается в адаптации численных расчетов магнитных полей к анализу параметров и характеристик ЭМ [1].

Численные расчеты магнитных полей в ЭМ могут эффективно проводиться методом конечных элементов (МКЭ). Существуют программы, которые позволяют это сделать как в двухмерной, так и трехмерной постановке.

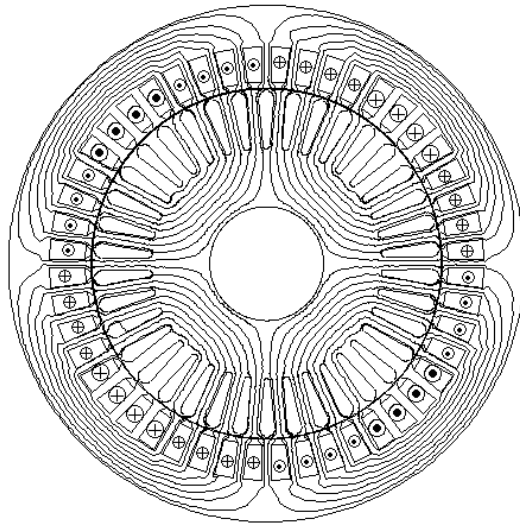


Рис. 1. Расчётная модель асинхронного двигателя с картиной магнитного поля для режима ХХ

В большинстве случаев для получения необходимого уровня достоверности результатов достаточно двухмерной постановки полевых задач.

Целью данной работы является анализ МП асинхронного двигателя (АД) в режимах холостого хода (ХХ) и номинальной нагрузки на основе МКЭ.

В качестве объекта для исследования принят трехфазный АД мощностью 15 кВт на номинальное фазное напряжение 220 В, спроектированный в [2]. Его расчётное поперечное сечение представлено на рис.1. Данный АД имеет число пар полюсов $p=2$, высоту оси вращения $h=0,15$ м, наружные диаметры статора $d_{se}=0,272$ м и ротора $d_r=0,184$ м, воздушный зазор $\delta=0,5$ мм.

Графически модель АД реализуется в программе КОМПАС V7 с последующим импортированием файла в формате dxf в среду программы FEMM [3]. Здесь автоматически создается конечно-элементная структура задаваемого уровня, фрагмент которой в области зазора представлен на рис. 2.

Программа FEMM реализует на основе МКЭ уравнение, описывающее МП (в нашем случае в двухмерной постановке – в поперечном сечении АД):

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (1)$$

где A_z, J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и вектора плотности тока; \vec{k} – орт.

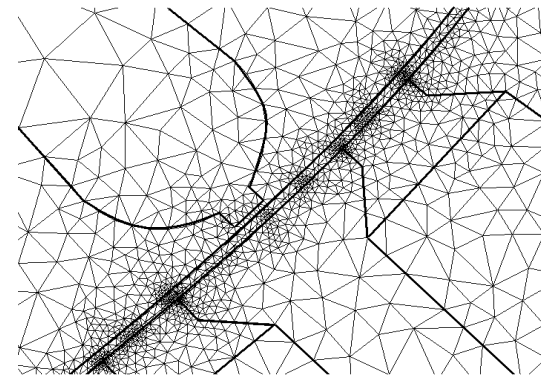


Рис. 2. Треугольная конечно-элементная сетка

Магнитная проницаемость, как функция магнитной индукции B , определяется посредством кривой намагничивания материала $H(B)$:

$$\mu = \frac{B}{H(B)}. \quad (2)$$

Для неферромагнитных участков области расчета задана магнитная проницаемость μ_0 . Для используемой в магнитопроводе данного АД стали 2013

введена численно кривая намагничивания, поскольку в стандартной библиотеке FEMM ее не оказалось. Шихтовка сердечников статора и ротора учитывается заданием коэффициента их заполнения сталью, равного 0,97 [2].

При расчете распространение МП ограничивается внешней поверхностью сердечника статора (рис.1), где для ВМП задано условие Дирихле [3]:

$$A_z = 0. \quad (3)$$

Для тестирования программы FEMM расчеты МП проведены в сопоставлении с расчетами магнитной цепи АД по классической методике [2].

Первым этапом расчета МП МКЭ по программе FEMM был режим XX АД. Основой расчета явился намагничивающий ток обмотки статора $I_{\mu}=7,75$ А, найденный при проектировании АД классическим методом магнитной цепи по заданному номинальному магнитному потоку $\Phi=9,01 \cdot 10^{-3}$ Вб.

По пазам статора (рис. 1) токи распределены с учетом схемы его обмотки (однослойная без укорочения) и числа эффективных проводников на паз. На рисунке фаза *A* обозначена более крупными значками направления тока, фазы *B* и *C* - меньшими. На каждый полюс АД приходится 12 пазов, а каждую фазу обмотки статора - по 4 пазы [2]. Токи в обмотке предполагаем, естественно, синусоидальными и берем момент времени, когда в фазе *A* ток равен амплитудному значению: $i_{sA} = I_{ms} = \sqrt{2}I_{\mu} = 10,96$ А. Тогда в фазах *B* и *C* мгновенные значения токов: $i_{sB} = i_{sC} = -0,5I_{ms}$. Так как в режиме XX создаваемый электромагнитный момент расходуется только на преодоление внутренних потерь момента вращения, то ток в обмотке ротора относительно очень мал и им при расчете МП в этом режиме пренебрегаем.

При запуске программы FEMM для режима XX была генерирована конечно-элементная структура из 47338 узлов и 94314 треугольников. Расчет МП на компьютере с процессором Genuine Intel 2,2 GHz длился 7 мин. Полученная картина силовых линий МП АД (линий равного ВМП) дана на рис.1. Она соответствует существующим представлениям о структуре МП в АД.

Для расчета МП АД в режиме нагрузки необходимо задать соответствующее распределение токов в обоих его обмотках. Эта процедура является менее определенной, чем в режиме XX, несмотря на то, что номинальные токи в фазной обмотке статора и в стержне короткозамкнутой обмотки ротора найдены в процессе проектирования: $I_{sN}=29$ А, $I_{rN}=442$ А. Дело в том, что в АД должны быть согласованы не только значения токов, но и их временные фазовые соотношения, переходящие на расчетной графической модели в пространственные смещения токовых структур.

Одним из относительно простых методов согласования токов является использование схем замещения АД. Из их существующих типов [4] был выбран классический Т-образный вариант (рис.3).

Параметры такой схемы рассчитываются при проектировании [2]: активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки статора: $R_s=0,402$ Ом, $X_{\sigma s}=0,725$ Ом; приведенные сопротивления фазы обмотки ротора: $R'_r=0,196$ Ом, $X'_{\sigma r}=1,02$ Ом; сопротивления намагничивающей ветви: $X_m=27,66$ Ом; $R_m=1,9$ Ом.

Для варьируемого параметра схемы замещения – скольжения s было принято номинальное значение $s_N=0,026$.

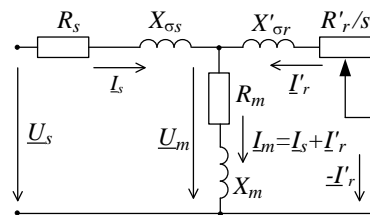


Рис.3. Т-образная схема замещения

По схеме замещения расчет проводится как для обычной электрической цепи синусоидального тока символическим методом. При этом оперируем с комплексными сопротивлениями в показательной форме:

- сопротивление цепи статора:

$$\underline{Z}_s = R_s + jX_{\sigma s} = 0,8289e^{j60,99^\circ} \text{ Ом}, \quad (3)$$

- сопротивление цепи ротора:

$$\underline{Z}_r = \frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r} = 7,5785e^{j7,73^\circ} \text{ Ом}, \quad (4)$$

- сопротивление намагничивающей цепи:

$$\underline{Z}_m = R_m + jX_m = 27,7252e^{j86,08^\circ} \text{ Ом}, \quad (5)$$

- эквивалентное сопротивление намагничивающей цепи и цепи ротора:

$$\underline{Z}_{mr} = 6,9564e^{j21,95^\circ} = 6,4523 + j \cdot 2,5999 \text{ Ом}, \quad (6)$$

- эквивалентное сопротивление всей цепи:

$$\underline{Z}_{ekv} = 6,8543 + j \cdot 3,3325 = 7,6182e^{j25,88^\circ} \text{ Ом}. \quad (7)$$

Для фазного напряжения обмотки статора задаем начальную фазу $\Psi_{U_s} = 0$ и имеем $\underline{U}_s = U_{sN} = 220$ В. Тогда комплекс тока статора

$$\underline{I}_s = \frac{U_s}{\underline{Z}_{ekv}} = 28,8783e^{-j25,88^\circ} \text{ А}, \text{ начальная фаза этого тока } \psi_s = -25,88^\circ.$$

Определив напряжение U_m на намагничивающей ветви:

$$\underline{U}_m = \underline{I}_s \cdot \underline{Z}_m = 200,8897e^{-j3,93^\circ} \text{ В}, \quad (8)$$

имеем обращенный приведенный ток ротора, который согласно схеме замещения направлен встречно току \underline{I}'_r :

$$-\underline{I}'_r = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}_r} = 26,5077e^{-j11,67^\circ} \text{ А}, \quad (9)$$

откуда у тока $-\underline{I}'_r$ начальная фаза $\psi_r = -11,67^\circ$.

Соотношения рассмотренных величин иллюстрирует векторная диаграмма (рис.4), где дан и необращенный приведенный ток ротора \underline{I}'_r .

Действующие значения фазных токов статора и ротора:

$$I_s = 28,87 \text{ А}, \quad I_r = \underline{I}'_r K_I = 448,9 \text{ А}, \quad (10)$$

где коэффициент приведения тока обмотки ротора к току обмотки статора:

$$K_I = \frac{N_s \cdot K_{W_s} \cdot m_s}{N_r \cdot K_{W_r} \cdot m_r} \cdot \frac{1}{K_{sq}}, \quad (11)$$

m_s, m_r, N_s, N_r - числа фаз обмоток и последовательных витков на

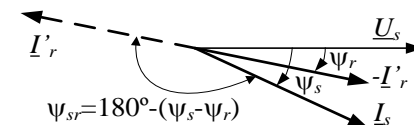


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжения и токов в режиме нагрузки

каждую обмотку (у короткозамкнутой обмотки ротора m_r равно числу стержней, а $N_r = \frac{1}{2}$); K_{Ws} , K_{Wr} - обмоточные коэффициенты; K_{sq} - коэффициент скоса пазов ротора.

Из рис.4 очевидно, что фазовый сдвиг между током статора I_s и приведенным I_r' (а значит и истинным I_r) током ротора определяется по их начальным фазам:

$$\psi_{sr} = 180^\circ - (\psi_r - \psi_s) = 180^\circ - [-11,67^\circ - (-25,88^\circ)] = 165,79^\circ, \quad (12)$$

что соответствует пространственному смещению структур токов на угол:

$$\alpha_{sr} = \frac{\psi_{sr}}{p} = 82,89^\circ. \quad (13)$$

Пространственное распределение токов в статоре АД в режиме нагрузки сохраняется таким же, как и в режиме ХХ. Однако, с учетом найденной величины тока статора в режиме нагрузки его амплитудное значение в фазе A будет равно $i_{sA} = I_{ms} = \sqrt{2}I_s = 40,7$ А, а в фазах B и C токи в этот момент времени:

$$i_{sB} = i_{sC} = -0,5 I_{ms}. \quad (14)$$

По числу пазов ротора Q_r определяется угол сдвига стержней друг относительно друга на пространственный угол:

$$\alpha_{rn} = \frac{360^\circ}{Q_r} = \frac{360^\circ}{38} \approx 9,47^\circ. \quad (15)$$

Тогда распределение многофазной системы токов в стержнях короткозамкнутого ротора по углу α , отсчитываемому от верхней вертикальной полюси сечения АД (рис.5), формируется в пространстве так:

$$i_{rk} = I_{mr} \sin\{p[(k-1)\alpha_{rn} + \alpha_{sr} + \alpha_{rn0}]\}, \quad (16)$$

где $k=1, \dots, Q_r$ - текущий номер паза; $I_{mr} = \sqrt{2}I_r = 634,8$ А - амплитуда тока в стержне ротора; α_{rn0} - координата 1-го паза. Направления токов ротора и рассчитанная картина МП АД в режиме нагрузки представлены на рис.5.

При расчете МП в режиме нагрузки программой FEMM генерирована конечно-элементная структура из 40188 узлов и 80243 треугольников, и расчет на указанной выше ЭВМ занимает 22 мин. Структура силовых линий МП представлена на рис.5 - она соответствует реальным представлениям о распределении этого поля АД в данном режиме. Очевидно, что по сравнению с режимом ХХ (рис.1) картина магнитного поля в режиме нагрузки под действием токов ротора в пространстве повернулась на некоторый угол.

Отметим, что максимальное значение ВМП в режиме ХХ $A_{\max} = 0,0384$ Вб/м, в режиме нагрузки $A_{\max} = 0,0317$ Вб/м.

Численный расчет МП дает прямой выход на целый ряд электромагнитных параметров ЭМ, исходные формулы для которых представлены в [1].

В нашем случае ограничимся сравнением результатов полевого расчета и классического расчета методом магнитной цепи [2] по основному магнитному потоку и магнитным индукциям на определенных участках области расчета.

Основной магнитный поток в воздушном зазоре определяется по полювому расчету через распределение ВМП с учетом активной длины АД [1]: $\Phi_o = 9,9 \cdot 10^{-3}$ Вб - для режима ХХ и $\Phi_N = 8,24 \cdot 10^{-3}$ Вб - для режима номинальной нагрузки. Напомним, что в соответствии с классическим подходом фигурировал поток $\Phi = 9,01 \cdot 10^{-3}$ Вб, который в принципе соответствует полученному при аналогичных условиях возбуждения Φ_o , но имеет заметное отличие. А расчет потока при совместном действии обмоток ротора и статора методом магнитной цепи весьма проблематичный и поэтому при проектировании не проводится.

Кроме того, для сравнения были определены значения магнитной индукции в спинках сердечников статора и ротора. Расчет по классической методике [2] дает: $B_{ys} = 1,65$ Тл - в спинке статора, $B_{yr} = 0,95$ Тл - в спинке ротора. Численный расчет позволил определить соответствующие значения индукции для двух рассматриваемых режимов работы. В режиме ХХ $B_{ys} = 1,75$ Тл, $B_{yr} = 1,19$ Тл, и соответственно в режиме нагрузки $B_{ys} = 1,5$ Тл и $B_{yr} = 0,93$ Тл.

Очевидное уточнение произошло благодаря гораздо меньшим допущениям численного метода расчета МП по сравнению с классическим методом. Погрешность последнего здесь приблизительно оценивается в 10%, что необходимо учитывать при проектировании и исследовании ЭМ.

Важным преимуществом численного расчета МП с помощью программы FEMM является простота определения распределений различных величин. В качестве примера на рис.6 представлено распределение радиальной составляющей магнитной индукции по полюсным делениям τ_p на линии окружности, проходящей на среднем уровне по высоте зубцов статора, на рис.7 - то же, но на среднем уровне по высоте зубцов ротора. Графики наглядно демонстрируют распределение магнитной индукции по пазам и зубцам: по ширине пазов и зубцов в распределении магнитной индукции наблюдается естественное чередование практически прямоугольных пиков и впадин.

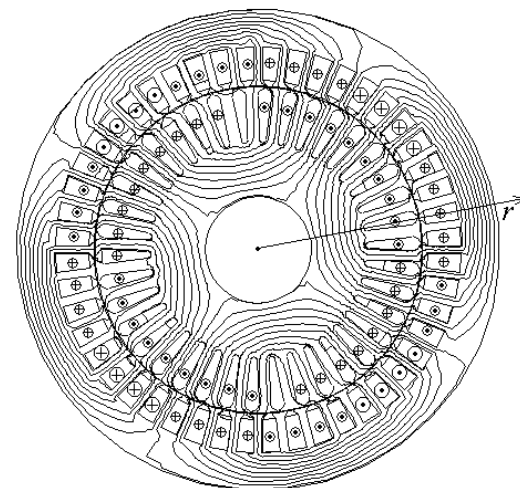


Рис. 5. Расчётная модель асинхронного двигателя с картиной магнитного поля в режиме нагрузки

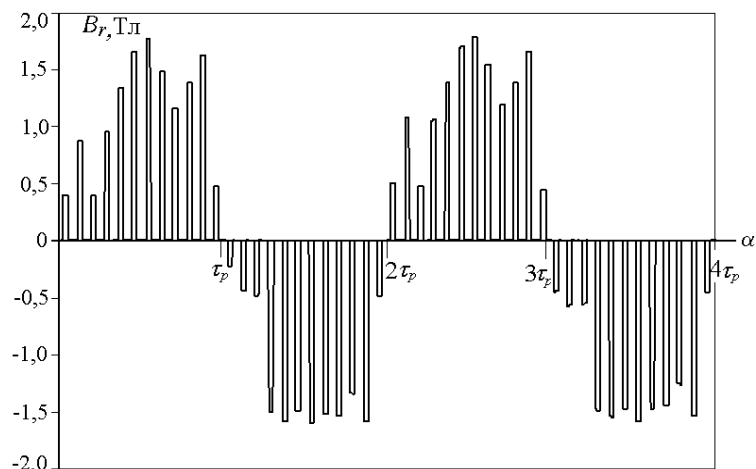


Рис.6. Распределения радиальной составляющей магнитной индукции по пазам и зубцам статора в режиме нагрузки

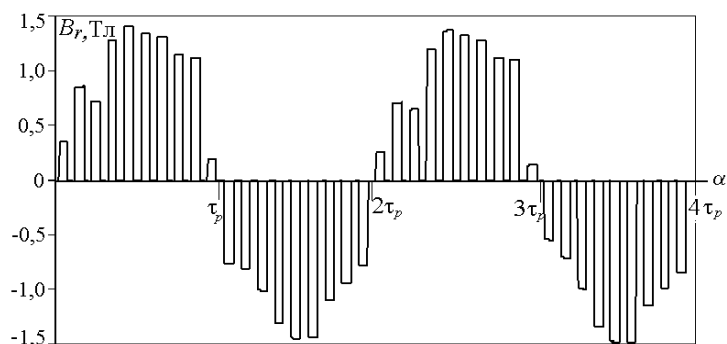


Рис.7. Распределения радиальной составляющей магнитной индукции по пазам и зубцам ротора в режиме нагрузки

На рис.8 представлено распределение нормальной составляющей индукции к радиальной линии, проходящей на рис.5 по зонам наибольших значений угловой составляющей магнитной индукции в спинках сердечников ротора и статора.

Одним из достоинств полевого подхода, среди прочих, есть еще прямое определение электромагнитного момента [1] на основании метода тензора магнитного натяжения [3]. Так в данном АД электромагнитный момент по программе FEMM при номинальных токах $M_{em}=94$ Н·м, а, для сравнения, по проектным параметрам АД [2] номинальный момент $M_N = 98$ Н·м.

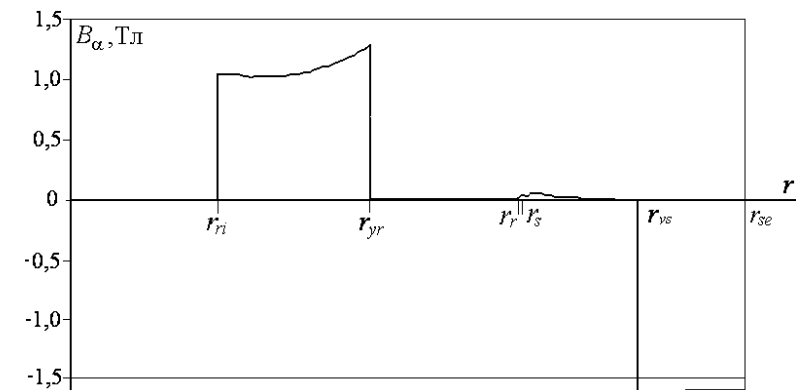


Рис.8. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции по радиальной линии: вал - спинка ротора (r_{ri} - внутренний и r_{yr} - наружный радиусы) - паз ротора (r_r - внешний радиус ротора) - воздушный зазор (r_s - внутренний радиус статора) - зубец статора - спинка статора (r_{yr} - внутренний и r_{se} - наружный радиусы)

На основании проведенных расчетов и анализа можно делать выводы:

- численно-полевой подход, в том числе и по программе FEMM, позволяет определить непосредственно целый ряд электромагнитных параметров АД и распределений величин, в том числе и таких, расчет которых по классической методике является весьма проблематичным;
- результаты расчета МП АД проявляют погрешность классического метода расчета магнитной цепи АД, так как МКЭ построен на значительно меньших допущениях;
- использование программы FEMM, основанной на МКЭ, значительно сокращает время комплексного исследования электромагнитных параметров АД и значительно расширяет исследовательские возможности по сравнению с классическими подходами.

Все это свидетельствует, что численно-полевой метод является весьма эффективным инструментом расчета магнитного поля и электромагнитных параметров практически любых ЭМ, в том числе и АД.

Список литературы: 1. Мильх В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // *Электротехника и электромеханика*. -2006. -№2. -С.40-46. 2. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин. // Под ред. И.П.Копылова – М.: Энергия, 1980. - 496с. 3. Meeker D. *Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual*, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003. 4. Вольдек А.И. *Электрические машины*. - Л.: Энергия, -1978. -832 с.

Поступило в редколлегию 1.06.07