

УДК 62-83:621.313

А.Ю. Смирнов

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ОКБ им. Африкантова

Рассматривается задача расчёта электромагнитного момента асинхронных двигателей методом конечных элементов (МКЭ), в том числе этапы создания модели, особенности её применения и исследования посредством гармонического анализа. Получено совпадение расчётного и экспериментального значений пускового момента герметичного асинхронного двигателя, применение МКЭ рекомендовано для расчёта электромагнитного момента нестандартных конструкций асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, метод конечных элементов (МКЭ), электромагнитный момент, скольжение, механическая характеристика.

Повсеместное внедрение вычислительной техники в практику инженеров и исследователей требует применения расчётных методов, отражающих современный уровень развития вычислительных возможностей.

Наиболее глубокую картину электромагнитных процессов в любой электрической машине, в том числе и в асинхронной, обеспечивает метод конечных элементов (МКЭ) [1]. В настоящее время он реализован в ряде пакетов прикладных программ, позволяющих рассчитать векторный или скалярный магнитный потенциал узлов сетки, представляющей сеточную (конечно-элементную) модель машины. Постпроцессорная обработка этих результатов позволяет определить все необходимые характеристики объекта.

Метод и реализующее его программное обеспечение получили широкое применение в зарубежной и отечественной практике расчётов синхронных машин, в том числе с постоянными магнитами [2, 3], электромагнитных подшипников, электромагнитных механизмов.

Вместе с тем, в отечественных разработках асинхронных двигателей МКЭ и реализующие его сеточные модели машин используются недостаточно, что связано с наличием отработанных десятилетиями методик проектирования, имеющих достаточно простое математическое описание. Кроме того, сеточные модели машин с индуктированными токами несколько сложнее, требуют расчёта нестационарных (гармонических) полей и представлены, полностью или частично, конечными элементами с дополнительными степенями свободы по напряжению или току для проводящих областей машины.

Несмотря на это, МКЭ может стать незаменимым инструментом при выполнении поверочных расчётов нестандартных, многообмоточных и совмещённых электрических машин там, где использование классики проектирования вызывает затруднения или может привести к неверным результатам.

Плоская (планарная) задача решается относительно векторного магнитного потенциала узлов, связанного с магнитной индукцией B в данной точке через известное соотношение векторного поля

$$B = \operatorname{rot} A = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y},$$

где A – векторный магнитный потенциал и его частные производные вдоль соответствующих координат на плоскости. Его вектор направлен перпендикулярно плоскости рисунка и используется для расчёта областей с током и без него.

Объёмная задача решается относительно скалярного магнитного потенциала узлов V_m :

$$H = \text{grad } V_m = \frac{\partial V_m}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial V_m}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial V_m}{\partial z} \mathbf{k},$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – координатные векторы единичной длины – орты.

Геометрия областей с током (проводов и катушек) в объёмной модели строго не воспроизводится, а заменяется комбинацией стандартных фигур – примитивов, внутри которых поле не вычисляется. Для моделирования поля вне этих областей используются уравнения Био-Саварра.

Независимо от используемого пакета прикладных программ, процесс создания планарной сеточной модели асинхронного двигателя можно разбить на следующие стадии:

1) выделение в расчётной модели одного полупериода периодической структуры магнитопровода статора и одного полупериода магнитопровода ротора. В машинах с симметричными обмотками полупериодом является половина зубцового деления соответствующего магнитопровода;

2) нанесение на рабочую область построения модели ключевых точек полупериода одной из выделенных структур, например статора. Под ключевыми точками понимаются точки пересечения линий полупериода выделенной структуры, в том числе и с линиями их ограничивающими;

3) построение линий и областей модели выделенной структуры по нанесённым ключевым точкам;

4) присвоение областям свойств материала и типа элементов, на которые они будут разбиты при нанесении сетки. Под типом элемента понимается его имя в используемом пакете прикладных программ, число степеней свободы (физических величин, количественно определяющих состояние фрагмента модели, представленного этим элементом) и набор констант, обусловленных характеристиками замещаемой области. Для областей, занятых катушечными сторонами обмотки, в этот набор входят: площадь поперечного сечения, число витков, протяжённость в осевом направлении, направление тока (положительное или отрицательное) и коэффициент заполнения;

5) генерация сетки и её отражение вместе с областями, ею занятыми, на вторую половину периода выделенной структуры;

6) построение областей и сетки всего магнитопровода статора путём копирования периода структуры статора в полярной системе координат, объединение общих узлов и ключевых точек после копирования;

7) нанесение ключевых точек, построение областей и генерация сетки полупериода выделенной структуры ротора и примыкающего к ней фрагмента воздушного зазора, аналогично построениям перечислений 2 ÷ 6, выполненным для статора;

8) выделение нескольких компонентов (частей) модели:

- из узлов на линии поверхности расточки статора;
- из элементов воздушного зазора, примыкающих к линии расточки статора. Оба перечисленных компонента связываются между собой как смежные (примыкающие) регионы;
- из элементов ротора;
- из областей ротора и воздушного зазора;

9) приложение нагрузок и граничных условий. Под нагрузками понимаются электрические – плотность и напряжение, и механические – момент сил или силы, приложенные к ротору. Под граничными условиями можно понимать направление линий магнитной индукции на границе расчётной области. Оно может быть параллельным этой границе или перпендикулярным (нормальным). При нормальном направлении проводимость границ бесконечно велика (однородные граничные условия Дирихле [4]) и силовые линии беспрепятственно пересекают границу расчётной области, пересекаясь во внешнем пространстве. При параллель-

ных границе силовых линиях (условие Неймана [4]) поток во внешнее пространство не выходит и замыкается внутри расчётной области.

Расчёт созданной планарной модели выполняется относительно векторных магнитных потенциалов узлов сетки. Различают статический, гармонический и переходный (TRANSIENT) анализ.

В статической задаче приложенные нагрузки (напряжения и токи) не зависят от времени. Они не вызывают токов в замкнутых контурах, образованных катушками обмоток, и не наводят вихревых токов в массивных проводящих частях машины.

В гармоническом анализе электрические нагрузки изменяются по синусоидальному закону. Они вызывают токи в замкнутых контурах и наводят вихревые токи в массивных проводящих частях.

В переходном анализе нагрузки изменяются по времени по некоторому известному закону. При этом в модели также присутствуют обмотки (катушечные стороны), образующие замкнутые электрические контура и/или массивные проводящие части из материала, обладающего конечным электрическим сопротивлением.

Наиболее известным программным продуктом, позволяющим выполнять расчёты электрических машин методом конечных элементов, является ANSYS/Emag (разработки американской фирмы ANSYS).

Гармонический анализ сеточных моделей предполагает допущение о синусоидальности магнитного потока. Под влиянием насыщения кривая индукции в области зубцовых зон и в воздушном зазоре, естественно, принимает форму, отличную от синусоидальной, несмотря на синусоидальный ток. Однако, если принять во внимание, что в данном анализе фигурируют усреднённые по времени значения момента и потерь мощности, то можно прийти к заключению о корректности данного допущения, обычного при исследовании установившихся режимов работы машин переменного тока.

Краевыми эффектами, обусловленными изменением направления индуцированных токов на противоположное, целесообразно пренебречь, что позволит использовать двухмерные модели вместо трёхмерных. Сопротивлением короткозамыкающих колец желательнее (но не обязательно) пренебречь.

Последние два допущения позволяют строить компактные и высокопроизводительные сеточные модели асинхронных двигателей, состоящие только из планарных элементов, не привлекая при этом цепные элементы, воспроизводящие электрические цепи замыкания стержней короткозамкнутой обмотки между собой.

Сеточная модель глубокопазного асинхронного двигателя, генерированная с учётом принятых допущений в программной среде ANSYS/Emag, представлена на рис. 1 (для большей чёткости изображения сетка в пазах ротора не показана).

Модель представлена восьмиузловыми планарными элементами трёх типов, отличающихся степенями свободы. Непроводящие части магнитной цепи представлены элементами, степенью свободы которых является только векторный магнитный потенциал. Стержни обмотки ротора и катушечные стороны обмотки статора представлены элементами, которые дополнительно характеризуются напряжением и током соответственно. В случае пренебрежения активным сопротивлением короткозамыкающих колец узлы элементов всех стержней связываются единым приложенным к ним напряжением.

Узлы элементов каждой из катушечных сторон обмотки статора связываются условием протекания по ним одинакового тока и цепными элементами, замещающими катушечные стороны обмотки статора, соединёнными между собой последовательно согласно, в соответствии с электрической схемой обмотки. Ветви с цепными элементами катушечных сторон разных фаз обмотки сопрягаются между собой параллельно (рис. 2). Они воспроизводят звезду, замкнутую накоротко нулевым сопротивлением трёхфазного источника напряжения.

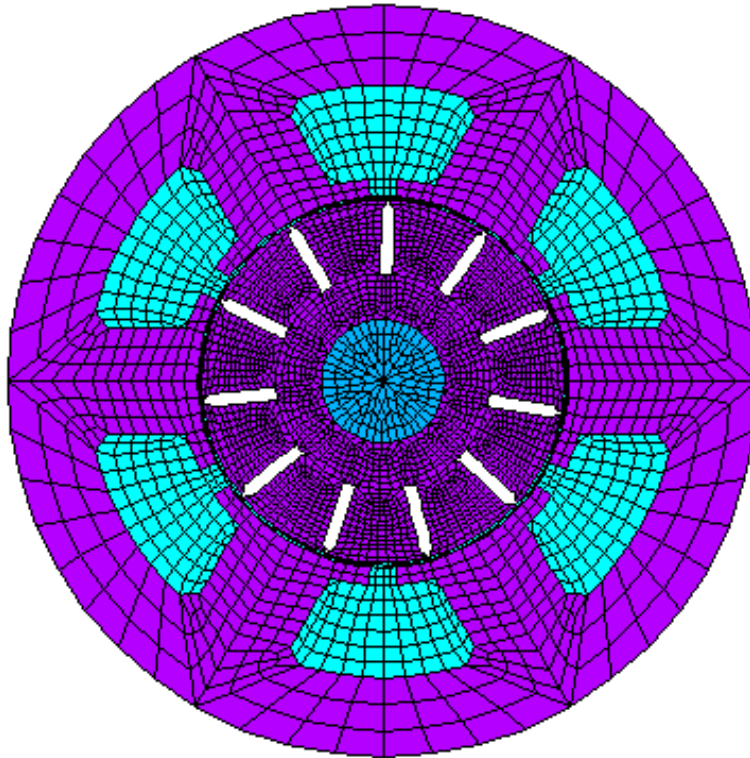


Рис. 1. Сеточная модель глубокопазного асинхронного двигателя

Направление тока катушечных сторон, прямое или обратное, учитывается одной из констант набора, приписываемого элементам обмотки статора. В этот набор констант также входят длина машины в осевом направлении, площадь сечения катушечной стороны, число её витков и коэффициент заполнения.

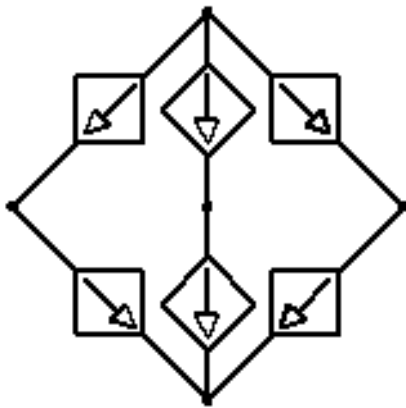


Рис. 2. Цепные элементы, замещающие обмотку статора

Элементы ротора с магнитопроводом, стержнями короткозамкнутой обмотки и валом объединяются в единый компонент, который является объектом приложения электромагнитных сил, создающих вращающий момент.

В большинстве задач полем за пределами внешней поверхности корпуса статора следует пренебречь и исходить из условия параллельности силовых линий наружной поверхности расчётного пространства (условие Неймана). В этом случае задаётся нормальная к границе составляющая градиента потенциала. В планарных моделях вращающихся электрических машин она совпадает с внешним диаметром окружности статора.

Модель составлена для взаимно неподвижных ротора и статора, и в непосредственном виде может быть использована для расчёта пускового момента асинхронного двигателя. Распределение линий магнитной индукции для этого случая представлено на рис. 3, а.

Для расчёта других точек механической характеристики, при вращающемся роторе, необходимо корректировать сопротивление материала магнитопровода и стержней ротора при каждом значении скольжения, увеличивая его расчётное значение в соответствии с функцией скольжения:

$$R_p = R_\Phi \frac{1-s}{s},$$

где s – скольжение; R_p , R_Φ – расчётное и фактическое сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора, определённые исходя из удельного сопротивления применённого материала.

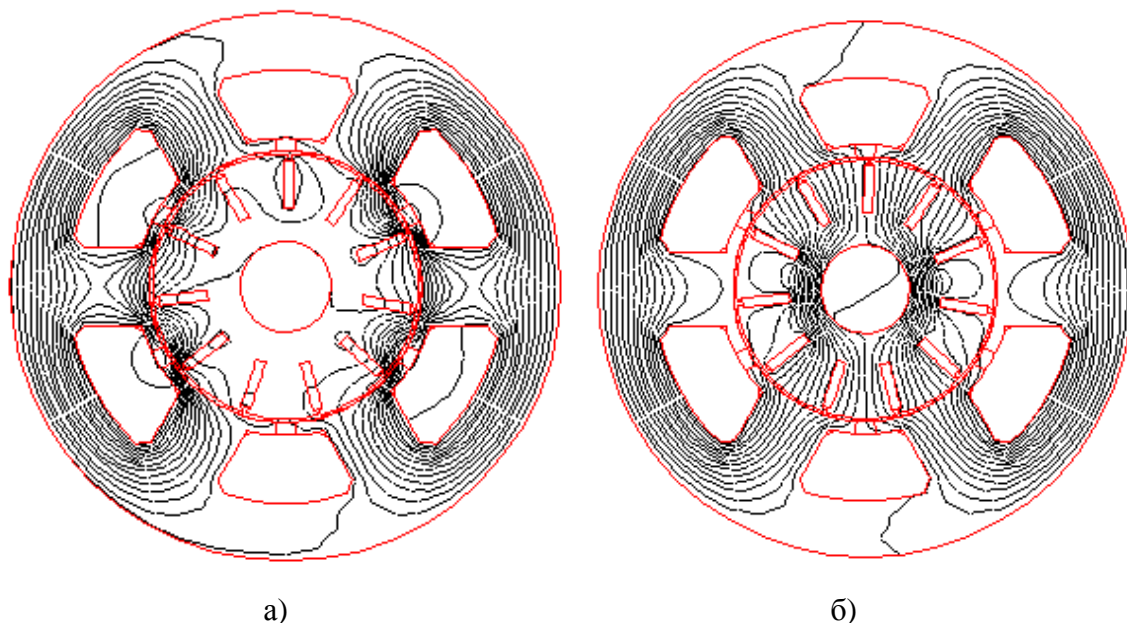


Рис. 3. Распределение силовых линий магнитной индукции при пуске (а) асинхронного двигателя и на холостом ходу (б)

Для этих точек имеет место различие расчётных и фактических потерь холостого хода в роторе. В расчётной модели оно будет несколько выше, вследствие большей частоты перемагничивания. Однако добавочными вихревыми моментами в асинхронных двигателях с шихтованным ротором, как правило, пренебрегают вследствие их малости. Распределение линий магнитной индукции при работе под нагрузкой, близкой к номинальной, показано на рис. 3, б. Нетрудно видеть, что после разгона замыкание линий магнитного потока обмотки статора преимущественно по путям потока рассеяния сменяет замыкание его через ротор по путям потока взаимной индукции.

Значительно в большей степени на электромагнитный момент и форму механических характеристик могут влиять добавочные асинхронные моменты от действия зубцовых и других высших гармоник. Их можно вычислить, традиционно применяя принцип наложения. Добавочные моменты от каждой из них необходимо сложить с моментом от первой гармоники. При этом расчётное сопротивление материала стержней короткозамкнутого ротора следует корректировать в соответствии с номером ν гармоники:

$$R_{p\nu} = R_\Phi \frac{1 - s\nu}{s\nu}.$$

Полное совпадение расчётных и фактических потерь в роторе сеточная модель обеспечивает в двух режимах работы асинхронной машины: короткого замыкания и холостого хода. В первом так же, как и в модели, ротор неподвижен, а во втором потери отсутствуют, что легко учитывается введением очень большого сопротивления для материала стержней. Поэтому возможен ещё один способ определения электромагнитного момента асинхронной машины: по расчётным данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Из результатов расчёта этих режимов посредством сеточной модели определяются мощности потерь холостого хода (P_0) и короткого замыкания (P_k). Используя параметрические данные и схему соединения катушек, можно вычислить активное сопротивление фазы. Для двигателя с единственной катушкой в каждой фазе по рис. 1 оно составит

$$R_1 = 2\rho \frac{lw^2}{SK_3},$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводов, увеличенное с учётом длины лобовых частей и фактической температуры обмотки; l , w , S и K_3 – параметры обмотки, содержащиеся в константах модели (соответственно длина пазовой части катушек, число витков, площадь паза и коэффициент его заполнения).

Затем вычисляется ток статора при холостом ходе и коротком замыкании:

$$I_{1o} = \sqrt{\frac{P_o}{mR_1}} \text{ и } I_{1к} = \sqrt{\frac{P_к}{mR_1}}$$

соответственно (m – число фаз обмотки статора).

Коэффициент мощности в этих режимах

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{mUI_{1o}} \text{ и } \cos \varphi_к = \frac{P_к}{mUI_{1к}}$$

соответственно, где U – напряжение сети.

Далее по известным соотношениям определяются параметры схемы замещения: активное, полное и индуктивное сопротивления холостого хода и короткого замыкания:

$$Z_o = \frac{U}{I_{1o}}, \quad R_o = Z_o \cos \varphi_o, \quad X_o = \sqrt{Z_o^2 - R_o^2};$$

$$Z_к = \frac{U}{I_{1к}}, \quad R_к = Z_к \cos \varphi_к, \quad X_к = \sqrt{Z_к^2 - R_к^2}.$$

Электромагнитный момент в функции скольжения определяется из круговой диаграммы или по одной из известных зависимостей [5].

Для приближённых вычислений можно использовать формулу Клосса:

$$\frac{M}{M_{\max}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}},$$

где максимальный момент M_{\max} и критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ соответственно определяются отношениями

$$M_{\max} = \frac{pmU}{2\omega X_к};$$

$$s_{\text{кр}} \approx \frac{R_2'}{\sqrt{R_1'^2 + X_к^2}} \approx \frac{R_2'}{X_к},$$

где p – число пар полюсов обмотки статора; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота сети; R_2' – приведённое сопротивление вторичной цепи, вычисляемое из потерь в роторе $P_{2к}$ при коротком замыкании:

$$R_2' = \frac{P_{2к}}{mI_{1к}^2}.$$

В этом случае расчёт сеточ-

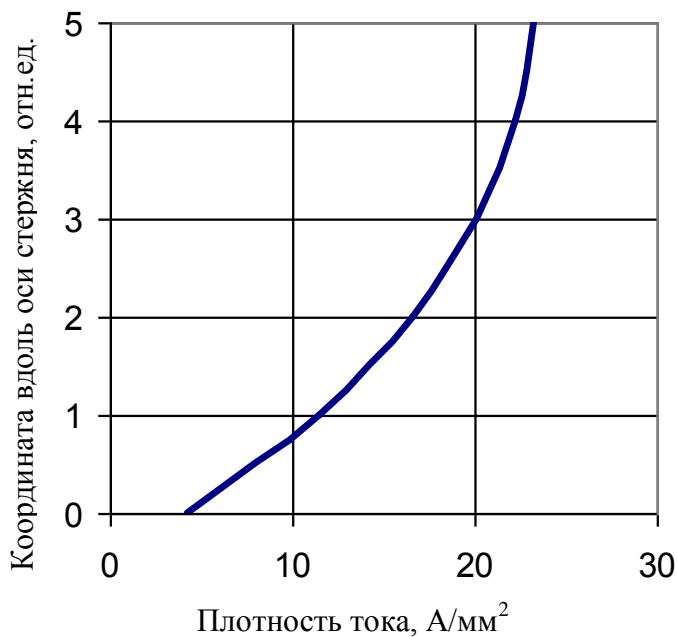


Рис. 4. Распределение плотности тока по высоте стержня при пуске асинхронного двигателя

ной модели достаточно выполнить только один раз – для режима пуска (короткого замыкания), данные режима холостого хода не используются.

Расчёты асинхронного двигателя с герметизирующей гильзой, вставленной в расточку статора, выявили практически полное совпадение расчётных и экспериментальных результатов при расчёте пускового момента, поскольку при этом учитывается реальное распределение тока по высоте и эффект его вытеснения к поверхности (рис. 4).

По мере разгона ротора и снижением скольжения, распределение тока по высоте стержней выравнивается.

Выводы

Сеточные модели наиболее эффективны при расчёте электромагнитного момента нестандартных конструкций электродвигателей, таких как герметичные и встраиваемые двигатели, двигатели с массивным ротором, с наличием проводящих конструктивных частей, внедрённых в магнитную цепь статора или ротора.

Независимо от этих отличий расчёт выполняется по единому алгоритму, а учёт конкретных конструктивных особенностей той или иной машины обеспечивается включением в модель дополнительных областей со своим набором электрических и магнитных характеристик применяемого материала.

Библиографический список

1. **Брынский, Е.А.** Электромагнитные поля в электрических машинах / Е.А. Брынский, Я.Б. Данилевич, В.И. Яковлев. – Л.: Энергия, 1979. – 176 с.
2. **Смирнов, А.Ю.** Исследование момента герметичной индукторной машины // Электротехника. 2007. №1. С. 51–55.
3. **Смирнов, А.Ю.** Применение сеточных моделей для исследования электропривода на базе индукторной машины // Электротехника. 2009. № 2. С. 28–32.
4. **Домбровский, В.В.** Справочное пособие по расчёту электромагнитного поля в электрических машинах / В.В. Домбровский. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
5. **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины: учеб. для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.01.2010*

A.Yu. Smirnov

APPLICATION OF NET MODELS FOR CALCULATION OF THE ELECTROMAGNETIC TORQUE OF INDUCTION MOTORS

The task of calculation of the electromagnetic moment of induction motors by the finite elements method (FEM), including stages of creation of model, feature of its application and research by means of the harmonious analysis is considered. Concurrence of settlement and experimental values of the starting torque of the hermetically sealed induction motor is received, application FEM is recommended for calculation of the electromagnetic torque of non-standard designs of induction motors.

Key words: induction motor, finite elements method (FEM), electromagnetic torque, sliding, mechanical characteristic.