

УДК 621.313.333

Параметрическая модель асинхронного двигателя с массивным ротором в установившихся и переходных режимах

В.Н. Караулов, И.А. Палилов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: wikt0r2012@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время, учитывая тенденцию создания объектно-ориентированных электромеханических систем, имеется значительный практический и научный интерес к асинхронным двигателям с массивным ротором, что определяет актуальность исследований, связанных с разработкой средств и методик проектирования и исследования таких машин.

Материалы и методы: Разработка параметрической модели асинхронного двигателя с массивным ротором осуществляется на основе классической теории переходных процессов в асинхронных машинах. Для проверки адекватности работы параметрической модели используется модель, основанная на конечно-элементном моделировании электромагнитных полей.

Результаты: Разработана простая параметрическая математическая модель асинхронного двигателя с массивным ротором в установившихся и переходных режимах. Результаты расчета сопоставлены с полевой моделью.

Выводы: Разработанная модель позволяет быстро и качественно оценить переходные и установившиеся режимы асинхронных двигателей с массивным ротором при различных условиях работы, в том числе аномальных.

Ключевые слова: математическая модель, асинхронный двигатель, массивный ротор, параметрическая модель, полевая модель.

Parametric model of induction machine with solid rotor in transient regimes

V.N. Karaulov, I.A. Palilov
Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: wikt0r2012@mail.ru

Abstract

Background: At the present time, given the trend of development object-oriented electro-mechanical systems, there are considerable practical and scientific interest in the induction motor with solid rotor, which determines the relevance of research related to the development of tools and techniques for the design and study of such machines.

Materials and methods: When developing a parametric model of an induction motor with solid rotor using the classical theory of transients in induction machines. To test the adequacy of the parametric model used a model based on finite element modeling of electromagnetic fields.

Results: A simple parametric mathematical model of the induction motor with massive rotor in steady-state and transitional regimes was developed. The calculation results were put in correspondence with field model.

Conclusions: The developed model allows to quickly and qualitatively evaluate steady-state and transitional regimes of the induction motor with massive rotor under different working conditions including abnormal ones.

Key words: mathematical model, induction motor, massive rotor, parametric model, the field model.

На данный момент одним из наиболее приоритетных путей при определении и исследовании характеристик электромеханических преобразователей различного типа является математическое моделирование. При математическом моделировании электромеханических процессов в асинхронной машине с массивным ротором необходимо учитывать нелинейность ферромагнетика, зубчатость сердечников, вихревые токи в роторе. Современные программы моделирования учитывают эти факторы в ходе расчётов мгновенных состояний электромагнитного поля: определяются потокосцепления обмоток, потери в стали и в обмотках, электромагнитный момент. Полевые расчеты выполняются совместно с решением уравнения движения ротора и уравнений равновесия напряжений в фазах. Таким образом, модели, основанные на расчётах

мгновенных состояний электромагнитного поля, дают полное представление о процессах, происходящих в электромеханическом преобразователе. Главным недостатком таких моделей является большое время, требующееся для расчета (часы, сутки). Данная проблема лишь частично снимается за счет использования плоскопараллельной модели электромагнитного поля в активной зоне машины и цепных моделей – в торцевых частях машины. Актуальной является задача разработки параметрической модели, предназначенной для расчета электромеханических процессов в асинхронной машине с массивным ферромагнитным ротором (МФР). Такая модель разработана на основе классической модели асинхронной машины в естественной фазовой системе координат (рис. 1). Зазор принимается гладким. Массивный ротор представляется в ви-

де вращающейся приведенной трехфазной обмотки. При частоте 50 Гц обмотки рассматриваются как электрические цепи с сосредоточенными параметрами, так как длина электромагнитной волны много больше линейных размеров обмоток. Принимается, что каждая фаза обмоток статора и ротора создает лишь основную пространственную гармоническую магнитного поля в зазоре. Моделью асинхронной машины (АМ) являются дифференциальные уравнения баланса напряжений фаз и уравнение движения ротора (рис. 1).

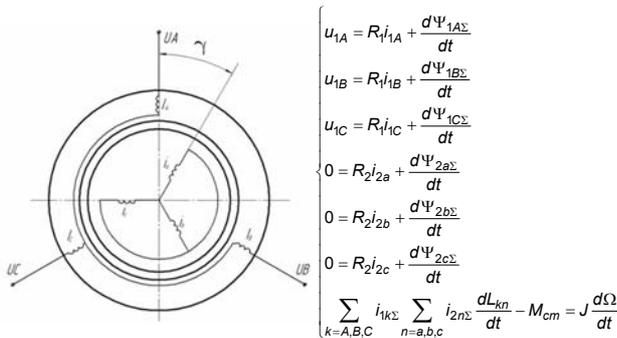


Рис. 1. Фазовая система координат и система дифференциальных уравнений переходного процесса АМ

Влияние насыщения и поверхностного эффекта на магнитное сопротивление массивного ротора и, соответственно, на параметры приведенной обмотки ротора учитывается с помощью универсальной зависимости, введенной Л.Р. Нейманом [3]. Параметры приведенной обмотки ротора определяются по алгоритму, представленному в [2]. Основные положения алгоритма представлены ниже на примере машины с одной парой полюсов.

Массивный ротор разбивается на $2N$ элементарных участков (рис. 2) (l_n – толщина участка; u_n – периметр поперечного сечения участка).

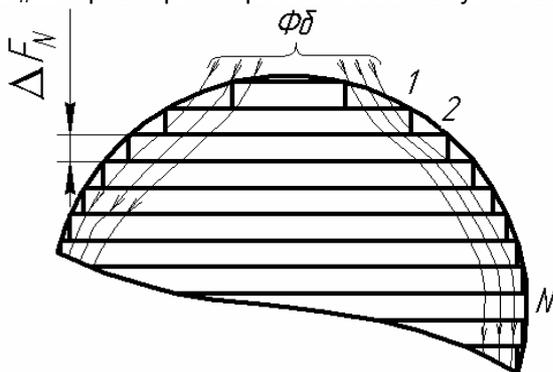


Рис. 2. Элементарные участки массивного ротора

Распределение намагничивающей силы вдоль окружности ротора принимается синусоидальным с амплитудой Fm_2 . Для N -го участка массивного ротора рассчитываются:

- единичное комплексное магнитное сопротивление [3]

$$\underline{Z}_{1N} = 8800 He_N^{0,417} \left(\frac{1,13}{\sqrt{1,13^2 + 1,85^2}} + j \frac{1,85}{\sqrt{1,13^2 + 1,85^2}} \right),$$

где $He_N = \frac{\Delta F_{2N}}{I_N}$ – действующее значение напряженности магнитного поля на поверхности участка; ΔF_{2N} – падение магнитного напряжения в участке;

- полное комплексное магнитное сопротивление участка при частоте перемагничивания f_1

$$\underline{Zm}_N = \frac{I_N}{u_N} \sqrt{f_1} \underline{Z}_{1N};$$

- магнитный поток в участке

$$\Phi(I_2')_N = \frac{\Delta F_2(I_2')_N}{\underline{Zm}(I_2')_N};$$

- эквивалентное магнитное сопротивление массивного ротора

$$\underline{Zm}_0 = \frac{2Fm_2(I_2')}{\Phi(I_2')_N};$$

- электрическое сопротивление приведенной обмотки ротора:

- при частоте перемагничивания f_1

$$\underline{Z20}'(I_2) = \frac{j}{\underline{Zm}_0} \frac{4mf(w_1 k_{ob})^2}{p};$$

- при частоте перемагничивания f_1^*s

$$\underline{Z20}'(I_2, s) = \frac{\underline{Z20}'(I_2)}{\sqrt{s}};$$

- активная и реактивная составляющие эквивалентного электрического сопротивления массивного ротора (фазы)

$$r_2'(I_2, s) = \text{Re} \left(\frac{\underline{Z20}'(I_2)}{\sqrt{s}} \right); \quad x_2'(I_2, s) = \text{Im} \left(\frac{\underline{Z20}'(I_2)}{\sqrt{s}} \right).$$

В переходных режимах токи в фазах статора несимметричны. Изображающий вектор тока статора имеет вид

$$I = \frac{2}{m} |i_A + i_B a + i_C a^2|,$$

где m – число фаз; i_A, i_B, i_C – мгновенные токи А,

В, С фаз статора; $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ – оператор поворота.

Полученный изображающий вектор тока эквивалентен по основной гармонической поля изображающему вектору тока при симметричном питании фаз статора.

Характеристика намагничивания магнитной цепи $\psi_m = f(I)$ рассчитывается при симметричном питании фаз статора. Амплитуда потокоцепления фазы статора рассчитывается как

$$\psi_m = \Phi_1 w_1 k_{ob} = \frac{E_1}{4,44 f_1}.$$

Действующее значение тока в фазе обмотки статора определяется по формуле

$$I = \frac{p\pi \sum F}{2\sqrt{2} m w_1 k_{ob}}.$$

Суммарное падение магнитного напряжения вдоль замкнутой линии магнитного потока (на два полюса) составляет

$$\sum F = 2F_{\delta} + 2F_{z1} + 2F_a + F2(l,s) \cdot |e^{j\pi/3}|.$$

При этом насыщение магнитной цепи статора учтено при расчете падений магнитного напряжения в зубцах и ярме статора; насыщение массивного ротора и действие поверхностного эффекта учтено при расчете падения магнитного напряжения в массивном роторе:

$$F2(l,s)e^{j\pi/3} = \Phi_1 Zm0(l,s)e^{j\pi/3}.$$

Главная индуктивность фазы в зависимости от тока и скольжения определяется по формуле

$$Lm(i,s) = \frac{\Psi_m}{I} = \frac{2\sqrt{2} m E_1 w_1 k_{об}}{\pi \cdot 4,44 f_1 \rho \sum F}.$$

Влияние насыщения коронок зубцов статора на магнитные проводимости пазового и дифференциального рассеяния учитывается с помощью традиционной методики [1].

Программа для расчета переходных процессов по вышеописанной методике реализована в среде MathCAD, принята матричная запись дифференциальных уравнений.

С помощью данной модели было произведено моделирование пуска асинхронного двигателя с массивным ротором, спроектированного на основе короткозамкнутого двигателя [1] (мощность 3 кВт, синхронная частота вращения 3000 об/мин) при различных условиях работы, в том числе аномальных (питание несинусоидальным напряжением). Для проверки адекватности результатов, получаемых с помощью математической модели, сопоставлена с математической моделью, основанной на расчетах мгновенных состояний электромагнитного поля.

Симметричный режим работы асинхронного двигателя с МФР. Рассмотрим пуск асинхронного двигателя (АД) с МФР на некоторую нагрузку. Произведем расчеты в параметрической и полевой моделях и сравним результаты по токам, скоростям и моментам. На рис. 3 показан ток одной из фаз статора АД с массивным ротором.

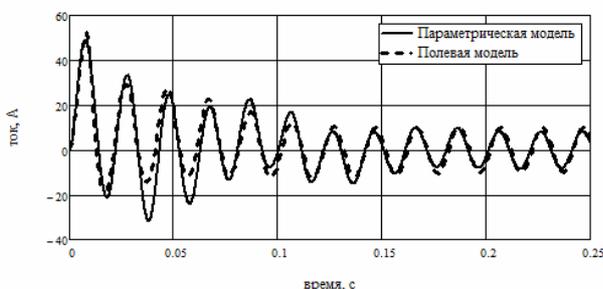


Рис. 3. Ток фазы при пуске

Кривые с определенной погрешностью сходятся. Расхождения объясняются принятыми допущениями. По полученным зависимостям также легко рассчитываются показатели работы машины в установившемся и переходном режи-

мах. Ток фазы статора быстро затухает до установившегося режима. Исходя из этого можно сделать вывод, что двигателям данного типа присуще быстрое затухание аperiodической составляющей тока при пуске из-за большого активного сопротивления ротора.

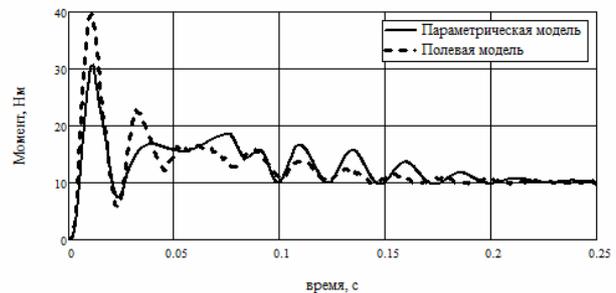


Рис. 4. Электромагнитный момент при пуске

На рис. 4 показано изменение электромагнитного момента АД с массивным ротором в переходном процессе пуска. Двигатель запускается, выходит на номинальную скорость при номинальной нагрузке. Максимальный бросок электромагнитного момента превышает номинальный момент почти в четыре раза. Такая высокая кратность обусловлена большой активной составляющей тока ротора. На графиках заметно отсутствие больших колебаний момента (знакопеременных), что также подтверждает быстрое затухание аperiodической составляющей токов статора и ротора.

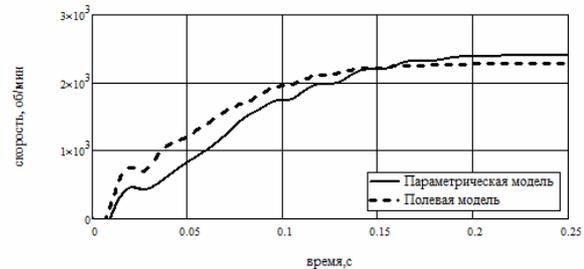


Рис. 5. Кривые разгона

Сравнение графиков показывает, что кривые, рассчитанные в разных моделях, практически сходятся, а значит, разработанная модель способна адекватно оценивать работу АД с МФР в симметричных режимах работы.

Несинусоидальное питание АД с МФР.

Анализируется процесс пуска АД с МФР при питании симметричным несинусоидальным напряжением. Форма питающего напряжения принята пилообразной с амплитудой, равной амплитуде при синусоидальном питании.

Двигатель запустился и набрал номинальную скорость при номинальной нагрузке. Ток статора имеет в своем составе множество временных гармонических составляющих как при пуске, так и в последующем установившемся режиме, появление которых обусловлено несинусоидальностью поля в зазоре.

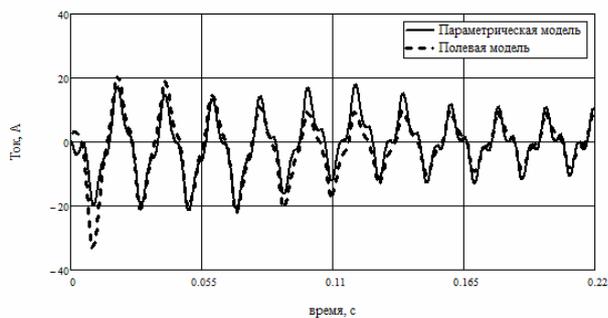


Рис. 6. Ток фазы при пуске

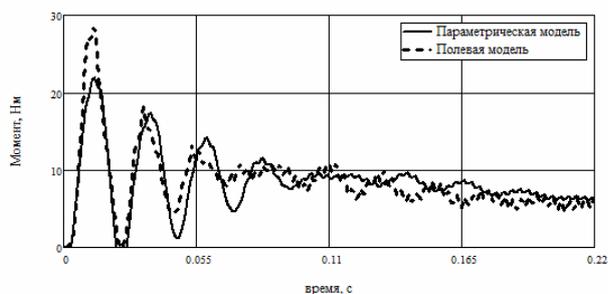


Рис. 7. Электромагнитный момент при пуске

Пульсации момента в установившемся режиме (рис. 7) обусловлены взаимодействиями прямых и обратных полей с токами, индуцированными этими полями, что свойственно для работы любого асинхронного двигателя при несинусоидальном питании.

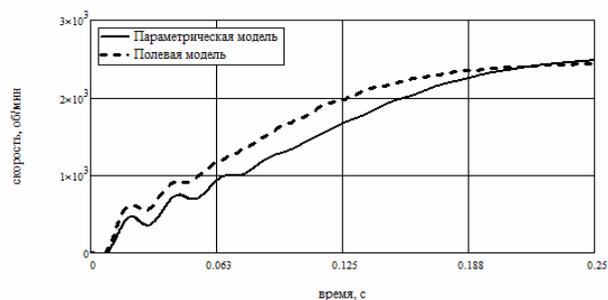


Рис. 8. Ток фазы при пуске

Караулов Виктор Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики,
телефон (4932)26-97-06,
e-mail: wikt2012@mail.ru

Палилов Илья Аркадьевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры электромеханики,
e-mail: i.palilov@yandex.ru

В кривой скорости (рис. 8) в установившемся режиме отсутствуют пульсации, что объясняется малой амплитудой колебаний электромагнитного момента в установившихся режимах. Расхождения в кривых объясняются принятыми допущениями.

Таким образом, разработанная простая параметрическая модель позволяет быстро и качественно оценить переходные и установившиеся режимы электроприводов с асинхронными двигателями с массивным ротором при различных условиях работы, в том числе аномальных.

Некоторые авторы [2] заявляют, что с увеличением мощности машины с массивным ротором зависимость параметров ротора от насыщения становится слабвыраженной. Исходя из этого можно предположить, что точность данной модели для более мощных машин становится большей.

Список литературы

1. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов. В 2-х кн.: кн. 2 / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.
2. Куцевалов В.М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 304 с.
3. Нейман Л.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. – Л.; М., 1949.

References

1. Kopylov, I.P., Klovok, B.K., Morozkin, V.P., Tokarev, B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat, 1993, book 2. 384 p.
2. Kutsevalov, V.M. *Voprosy teorii i rascheta asinkhronnykh mashin s massivnymi rotorami* [Theory and calculation of induction machines with solid rotors]. Moscow–Leningrad, Energiya, 1966. 304 p.
3. Neyman, L.R. *Poverkhnostnyy effekt v ferromagnitnykh telakh* [Skin-effect in ferromagnetic bodies]. Leningrad– Moscow, 1949. 152 p.