

УДК 621.321

Разработка динамической модели асинхронной машины с использованием результатов конечно-элементного расчета

Л.Н. Булатов, А.И. Тихонов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: ait@dsn.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: С развитием технологий параллельных вычислений второе рождение получают методы численного эксперимента, в частности методы расчета процессов в электромеханических устройствах с помощью комбинированной модели, объединяющей в себе расчет магнитного поля и электрической цепи. Это позволяет использовать результаты конечно-элементного расчета квазистационарного магнитного поля для моделирования переходных процессов в электромеханических устройствах.

Материалы и методы: Для расчета магнитного поля в асинхронной машине использован метод конечных элементов. Для расчета динамических режимов асинхронного двигателя использован метод контурных токов.

Результаты: Рассмотрен вариант использования результатов конечно-элементного расчета магнитного поля для моделирования переходных процессов в асинхронной машине, отличающийся от аналогичных полевых методов расчета динамики асинхронных машин быстродействием.

Выводы: Разработанный метод моделирования динамики асинхронного двигателя обеспечивает точность расчетов, характерную для полевых моделей, при скорости вычислений, соизмеримой со скоростью расчета цепных моделей и может использоваться при моделировании электропривода, в состав которого включена электрическая машина нетрадиционной конструкции.

Ключевые слова: САПР, асинхронный двигатель, конечно-элементная модель, динамическая модель.

Development of dynamic model of asynchronous machine with the use of finite-element calculation results

L.N. Bulatov, A.I. Tikhonov
Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: ait@dsn.ru

Abstract

Background: Technology development of parallel computing techniques give a rebirth of the numerical experiment, in particular, methods for calculating the processes in electromechanical devices using a combined model that combines the calculation of the magnetic field and electric circuit. This allows you to use the results of the finite-element calculation of the quasi-stationary magnetic field for the simulation of transient processes in electromechanical devices.

Materials and methods: To calculate the magnetic field in the asynchronous machine is used finite element method. To calculate the dynamic modes of the induction motor used in a method of loop currents.

Results: Consider using the results of finite element calculation of the magnetic field to simulate the transients in the asynchronous machine. From those of field methods for calculating the dynamics of induction machines this method of performance is different.

Conclusions: The developed method of dynamic simulation of the asynchronous machine promotes calculation accuracy typical for field models at calculation speed that is equivalent to calculation speed of chain models, and can be used to simulate electric drive with the integrated electric machine of unconventional construction.

Keywords: CAD, asynchronous engine, finite element model, dynamic model.

С развитием компьютерных технологий, в частности технологий параллельных вычислений, второе рождение получают методы численного эксперимента, применение которых ранее было затруднительно ввиду значительных временных затрат при их использовании. К этим методам относится расчет процессов в электромеханических устройствах с помощью модели, построенной на комбинации расчета магнитного поля и электрической цепи.

В частности, в комбинированной модели расчет квазистационарного магнитного поля может использоваться для получения матриц

потокоцеплений обмоток (контуров) с общим полем машины, рассчитанных при разных значениях токов в обмотках (контурах) и разных положениях ротора относительно статора. Эти матрицы затем используются в уравнениях, составленных на основе теории цепей, для расчета искомых величин. Для расчета переходного процесса используется итерационный метод Эйлера или Рунге-Кутты с постоянным шагом по времени Δt [1].

В ходе исследования возможности использования результатов конечно-элементного расчета квазистационарного магнитного поля

для расчета переходных процессов в электро-механических устройствах был предложен и опробован ряд вариантов, отличающихся способом обращения к конечно-элементной модели и принимаемыми допущениями. Базовая часть математического аппарата, используемого в каждой из этих моделей, остается неизменной.

Для расчета переходного процесса необходимо на каждом шаге интегрирования по времени решить систему уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = L^{-1}(u - Ri), \quad (1)$$

где $\frac{dx}{dt}$ – вектор приращений искомых величин (токов в обмотке якоря и контурах ротора, а также угла поворота и частоты вращения ротора); L – матрица коэффициентов, рассчитываемая на каждой итерации по результатам расчета магнитного поля.

В развернутом виде для частного случая асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_m}{dt} = U_m - I_m R_S - \sum_{k=1}^3 I_k \cdot R_{0S} \Big|_{m=1}^{m=3}, \\ \frac{d\Psi_m}{dt} = -I_m R_{Rm} - \sum_{k=4}^{Z+3} I_k \cdot R_{0R} \Big|_{m=4}^{m=Z+3}, \\ \frac{d\alpha}{dt} = \Omega, \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_{эм} - M_0 - M_H), \end{cases} \quad (2)$$

где R_{0S} , R_{0R} – сопротивления нулевых проводов обмоток статора и ротора; R_S , R_{Rm} – сопротивления фазной обмотки статора и m-го контура ротора; $\frac{d\Psi_m}{dt}$ – приращение потоко-сцепления обмотки от времени; Z – количество контуров ротора с учетом разбиения каждого стержня на слои для учета эффекта вытеснения тока; α – угол поворота ротора; Ω – частота вращения ротора; $M_{эм}$ – электромагнитный момент на валу машины (рассчитывается на основании результатов расчета магнитного поля); M_0 – момент холостого хода; M_H – момент нагрузки.

Для учета эффекта вытеснения тока каждый стержень короткозамкнутой обмотки ротора делится на слои (рис. 1).

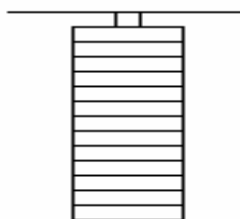


Рис. 1. Слои стержня ротора

Для расчета квазистационарного магнитного поля была разработана библиотека конечно-элементного моделирования [2], реализованная в настоящее время в двух вариантах: EMLib (разработана на Delphi, с возможностью параметрической генерации и визуализации модели) и UEMLib (язык программирования C++, оптимизированная, с возможностью подключения к кластеру для параллельных вычислений).

Для автоматизированной генерации конечно-элементных моделей асинхронных двигателей в среде Excel создан параметрический генератор, представляющий собой программный код на языке Visual Basic for Excel, обращающийся к функциям библиотеки EMLib. С помощью данного генератора была сформирована конечно-элементная модель асинхронного двигателя 4A112MA6У3 (рис. 2).

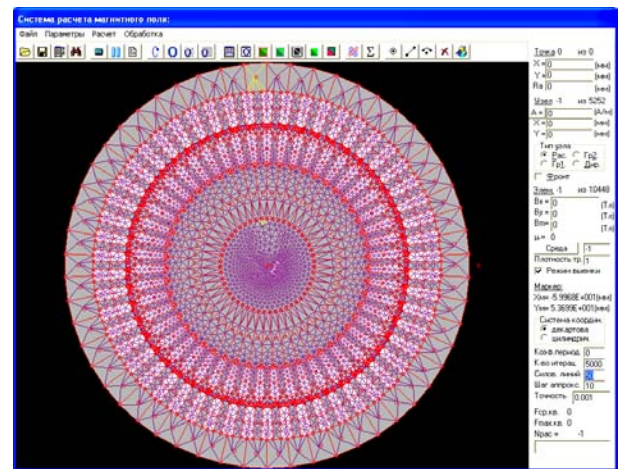


Рис. 2. Модель асинхронной машины, построенная с помощью библиотеки EMLib

Одним из вариантов комбинированной модели является модель с серией предварительных расчетов магнитного поля. При выборе этого варианта необходимо принять следующее допущение: обмотки статора и ротора симметричны, токи статора и ротора создают в зазоре синусоидальную намагничивающую силу (НС).

Серия расчетов магнитного поля может быть реализована в технологии параллельных вычислений. В частности, для моделируемого асинхронного двигателя была использована 128-процессорная вычислительная система «Энергет» (ИГЭУ).

Магнитное поле считалось в пяти вложенных циклах, в которых перебирались значения намагничивающих сил обмоток машины по осям координат $F_{Sx}, F_{Rx}, F_{Sy}, F_{Ry}$ (индекс S относится к обмоткам статора, R – к обмоткам ротора) и угла поворота ротора α .

Полученные зависимости потоко-сцеплений обмоток (k – номер обмотки)

$$\Psi_k = f(F_{Sx}, F_{Rx}, F_{Sy}, F_{Ry}, \alpha) \quad (3)$$

затем аппроксимировались пятимерными сплайнами и использовались для расчета частных производных, на основе которых строилась матрица коэффициентов системы уравнений, описывающих динамику машины. При этом компоненты намагничивающих сил обмоток статора при известных токах находятся как

$$\left. \begin{aligned} F_{Sxj} &= \sum_{k=1}^{N_j} F_{Sxjk} = i_{Sj} \sum_{k=1}^{N_j} W_{Sjk} \cdot \cos(p\varphi_{Sjk}) = i_{Sj} K_{Sxj}, \\ F_{Syj} &= \sum_{k=1}^{N_j} F_{Syjk} = i_{Sj} \sum_{k=1}^{N_j} W_{Sjk} \cdot \sin(p\varphi_{Sjk}) = i_{Sj} K_{Syj}, \end{aligned} \right\} (4)$$

где p – число пар полюсов; i_{Sj} – ток в j -й обмотке статора; W_{Sjk} – число витков в k -й секции j -й обмотки статора; φ_{Sjk} – угол наклона нормали k -й секции j -й обмотки статора; N_j – число секций j -й обмотки статора.

Компоненты намагничивающих сил обмотки ротора при известных токах находятся как

$$\left. \begin{aligned} F_{Rx} &= \sum_{k=1}^Z F_{Rkx} = \sum_{k=1}^Z i_{Rk} \cos(p\varphi_{Rk}) = \sum_{k=1}^Z i_{Rk} K_{Rkx}, \\ F_{Ry} &= \sum_{k=1}^Z F_{Rky} = \sum_{k=1}^Z i_{Rk} \sin(p\varphi_{Rk}) = \sum_{k=1}^Z i_{Rk} K_{Rky}, \end{aligned} \right\} (5)$$

где i_{Rk} – ток в k -м стержне ротора; φ_{Rk} – угол наклона нормали контура, образованного k -м стержнем j -й обмотки статора.

Для $\frac{d\Psi_m}{dt}$ в (2) справедливо разложение

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_m}{dt} &= \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial \Psi_m}{\partial F_{Sx}} \frac{dF_{Sxj}}{dt} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial F_{Sy}} \frac{dF_{Syj}}{dt} \right) + \\ &+ \sum_{j=4}^{3+Z_2 \cdot ns} \left(\frac{\partial \Psi_m}{\partial F_{Rx}} \frac{dF_{Rxj}}{dt} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial F_{Ry}} \frac{dF_{Ryj}}{dt} \right) + \frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \\ &= \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial \Psi_m}{\partial F_{Sx}} K_{xj} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial F_{Sy}} K_{yj} \right) \frac{di_j}{dt} + \\ &+ \sum_{j=4}^{3+Z_2 \cdot ns} \left(\frac{\partial \Psi_m}{\partial F_{Rx}} K_{xj} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial F_{Ry}} K_{yj} \right) \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \\ &= \sum_{j=1}^{3+Z_2 \cdot ns} L_{mj} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt}. \end{aligned} \quad (6)$$

Частные производные от потокосцеплений обмоток на текущем шаге интегрирования определяются по сплайнам при любой комбинации значений намагничивающих сил и угла α .

Результатами расчета модели являются зависимости токов в обмотках и контурах машины, момента на валу и частоты вращения ротора от времени (рис. 3, 4).

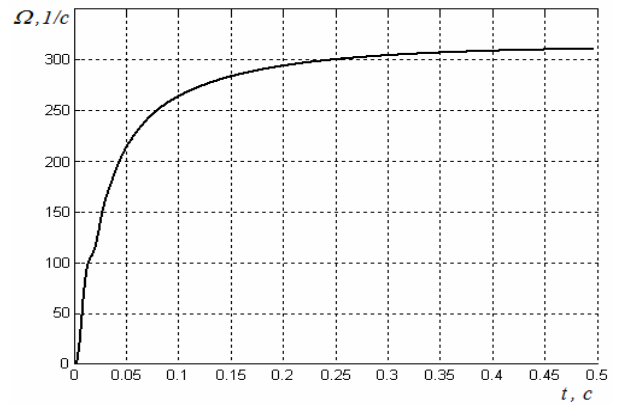


Рис. 3. Зависимость угловой скорости вращения машины от времени (идеальный холостой ход)

При использовании данного метода со значительными временными затратами связана преимущественно подготовка к расчету (расчет матриц потокосцеплений). Расчет собственно переходного процесса асинхронной машины длится несколько секунд.

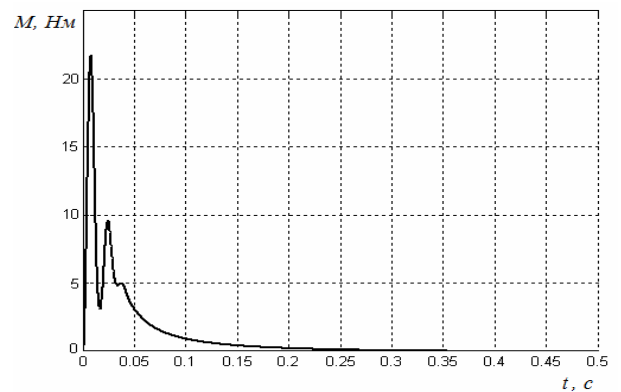


Рис. 4. Зависимость момента машины от времени

Таким образом, разработанный метод моделирования динамики асинхронного двигателя обеспечивает точность расчетов, характерную для полевых моделей, при скорости вычислений, соизмеримой со скоростью расчета цепных моделей и может использоваться при моделировании электропривода, в состав которого включена электрическая машина не традиционной конструкции.

Список литературы

1. Тихонов А.И., Кучеров С.Ю., Лашманов И.М., Рубцов Д.В. Использование виртуального лабораторного стенда в качестве подсистемы расширенного поверочного расчета в функциональном проектировании электромеханических устройств // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 11–14.
2. Тихонов А.И., Казаков Ю.Б. Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электромеханики / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 80 с.

References

1. Tikhonov, A.I., Kucherov, S.Yu., Lashmanov, I.M., Rubtsov, D.V. *Vestnik IGEU*, 2008, issue 3, pp. 11–14.

2. Tikhonov, A.I., Kazakov, Yu.B. *Programmirovaniye chislennogo eksperimenta s ispol'zovaniem konechno-elementnoy modeli magnitnogo polya v ob'ektakh elektro-*

mekhaniki [Simulation experiment programming with the usage of finite element model of magnet field in electromechanical objects]. Ivanovo, 2008. 80 p.

Булатов Леонид Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант,
e-mail: bulatovleo@gmail.com

Тихонов Андрей Ильич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой физики,
e-mail: ait@dsn.ru