

УДК 677.023:62-83

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ
В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СНОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ**

**MATHEMATICAL MODEL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS
IN THE MOTOR DRIVE SYSTEM WARPERS**

А.И. ТИХОНОВ, Л.Н. БУЛАТОВ, В.Ф. ГЛАЗУНОВ
A.I. TICHONOV, L.N. BULATOV, V.F. GLAZUNOV

(Ивановский государственный энергетический университет)
(Ivanovo State Power University)
E-mail: ait@dsn.ru

В статье представлена разработка математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, ориентированная на решение задачи оптимизации энергетических характеристик электропривода сновальной машины.

The article describes the development of a mathematical model of asynchronous motor with squirrel-cage rotor, focused on solving the problem of optimizing the energy characteristics of the electric warping machine.

Ключевые слова: сновальная машина, асинхронный двигатель, численное моделирование, конечно-элементный расчет.

Keywords: warping machine, induction motor, numerical modeling, finite element calculation.

Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением [1] для механизма намотки сновальных валов позволяет улучшить его энергетические и эксплуатационные характеристики, а также повысить эффективность партионного снования [2]. При этом возможная минимизация потерь в используемом асинхронном двигателе (АД) с короткозамкнутым ротором достигается поддержанием соответствующего отношения проекций вектора тока

статора на оси ортогональной системы координат d и q . Установленное в [3] существенное влияние на критерии оптимизации параметров электродвигателя обуславливает необходимость совершенствования его математической модели, позволяющей учитывать нелинейности и вариацию параметров. Использование для этой цели известной полевой модели, построенной на методе конечных элементов, требует значительного времени.

Здесь рассмотрим комбинированную быстродействующую полевую динамическую модель АД, построенную на основе многомерной сплайновой аппроксимации результатов серии расчетов магнитного поля [4], [5].

При построении модели вводятся допущения:

1) обмотки статора и ротора симметричные, токи статора и ротора создают в зазоре синусоидальную намагничивающую силу;

2) картина магнитного поля определяется только величиной и направлением результирующей намагничивающей силы (НС) машины и не зависит от того, какими именно обмотками создается эта НС.

В основе метода лежит возможность расчета переходных процессов в АД на ос-

новании предварительно полученных зависимостей потокосцеплений каждого m -го контура с током (обмотки статора или стержня ротора) от составляющих результирующей НС машины F_x и F_y и угла поворота ротора α , то есть

$$\Psi_m = f(F_x, F_y, \alpha). \quad (1)$$

Для построения этих зависимостей предварительно рассчитываются матрицы потокосцеплений, которые затем аппроксимируются трехмерными сплайнами. Для расчета матриц потокосцеплений используется библиотека конечно-элементного расчета магнитного поля [6].

Составляющие НС вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \sum_{m=1}^N \left(i_m \sum_{k=1}^{N_{sm}} [W_{km} \cos(p\varphi_{km})] \right) = \sum_{m=1}^N (i_m K_{xm}), \\ F_y &= \sum_{m=1}^N \left(i_m \sum_{k=1}^{N_{sm}} [W_{km} \sin(p\varphi_{km})] \right) = \sum_{m=1}^N (i_m K_{ym}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где i_m – ток в m -м контуре; W_{km} – число витков в k -й секции m -го контура; φ_{km} – угол наклона нормали k -й секции m -го контура; N – число контуров с током; N_{sm} – число секций m -го контура; p – число пар полюсов машины; K_{xm} , K_{ym} – коэффициенты, зависящие от конструкции и расположения обмоток статора и стержней ротора.

Зависимости (1) формируются в ходе серии расчетов магнитного поля при различных значениях величин F_x , F_y и α , варьируемых на всем диапазоне их возможного изменения. Полученные зависимости раскладываются в ряд Фурье с целью исключения «шумов» от гармоник высших порядков (при тестировании метода применялось устранение 12-й гармоники и выше). Очищенные от шумов зависимости (1) аппроксимируются трехмерными сплайнами.

В динамическом режиме АД описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\Psi_m}{dt} &= u_m - i_m r_m \Big|_{m=1}^{m=N}, \\ \frac{d\alpha}{dt} &= \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (M - M_b), \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где u_m – мгновенные значения фазных напряжений на обмотках статора (для контуров ротора $u_m = 0$); r_m – сопротивление m -го контура; ω – частота вращения ротора; J – момент инерции на валу ротора; M – электромагнитный момент АД; M_b – внешний момент на валу ротора.

С учетом разложения

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Psi_m}{dt} &= \frac{\partial\Psi_m}{\partial F_x} \frac{dF_x}{dt} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial F_y} \frac{dF_y}{dt} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \\
 &= \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial\Psi_m}{\partial F_x} \frac{dF_{xj}}{dt} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial F_y} \frac{dF_{yj}}{dt} \right) + \frac{\partial\Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \\
 &= \sum_{j=1}^{3+Z_2} \left(\frac{\partial\Psi_m}{\partial F_x} K_{xj} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial F_y} K_{yj} \right) \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \\
 &= \sum_{j=1}^{3+Z_2} L_{mj} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt},
 \end{aligned} \tag{4}$$

где Z_2 – количество стержней ротора (при этом $N = 3 + Z_2$, так как первые три уравнения описывают контуры, образованные фазными обмотками статора);

$$L_{mj} = \frac{\partial\Psi_m}{\partial F_x} K_{xj} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial F_y} K_{yj} \tag{5}$$

– взаимная индуктивность j -го и m -го контуров с током.

При расчете элементов матрицы коэффициентов L_{mj} используются частные производные функции (1), аппроксимированной трехмерными сплайнами. Аналогично рассчитываются и элементы матрицы, являющиеся частными производными функции (1) по углу поворота α .

Система уравнений (3) принимает вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_N \\ \omega \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1N} & \frac{\partial\Psi_1}{\partial \alpha} & 0 \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2N} & \frac{\partial\Psi_2}{\partial \alpha} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{N1} & L_{N2} & \dots & L_{NN} & \frac{\partial\Psi_N}{\partial \alpha} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} u_1 - r_1 i_1 \\ u_2 - r_2 i_2 \\ \dots \\ u_N - r_N i_N \\ 0 \\ \frac{1}{J}(M - M_B) \end{pmatrix}. \tag{6}$$

При работе над моделью особое внимание было уделено методам расчета электромагнитного момента. В комбинированной модели АД момент рассчитывается на основе магнитной энергии W . По этому методу:

$$M = \frac{\partial W}{\partial \alpha} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial\Psi_i}{\partial \alpha} i_i \right), \tag{7}$$

где $\frac{\partial\Psi_i}{\partial \alpha}$ – частная производная от пото-

косцепления i -й обмотки по углу поворота ротора, рассчитанная по сплайнам.

Система уравнений (6) представляет собой динамическую нелинейную модель АД, которая может быть интегрирована в модель привода механизма сновального вала. Особенность данной модели в том, что при численном решении уравнения динамики САУ матрица коэффициентов должна пересчитываться на каждом шаге интегрирования в зависимости от текущих значений токов и угла α . Для этого модель сопровождается набором сплайнов, ап-

проксимирующих функции (1) для каждого контура с током, по которым рассчитываются данные коэффициенты.

Следует отметить, что построение функций (1), требующее серии расчетов магнитного поля, может потребовать до нескольких часов расчетного времени, что характерно для полевых моделей. Однако решение системы уравнений (6), интегрированной в систему уравнений динамики САУ, осуществляется в реальном времени аналогично упрощенным моделям АД. При этом точность расчета динамики АД оказывается сопоставимой с точностью полевых моделей. Это значит, что при расчете динамики АД могут быть учтены разного рода несимметрии (например, несимметрия воздушного зазора), насыщение отдельных участков магнитной цепи (например, кромок зубцов), а также влияние на работу машины формы и несимметрии питающего напряжения.

Кроме того, модель можно усложнить, разбив каждый стержень ротора на n слоев, считая каждый слой самостоятельным контуром. Количество уравнений в модели (6) при этом увеличивается и становится равным $N = 3 + n \cdot Z_2$. Такая модель позволяет учесть влияние на динамику АД эффекта вытеснения тока в пазах ротора.

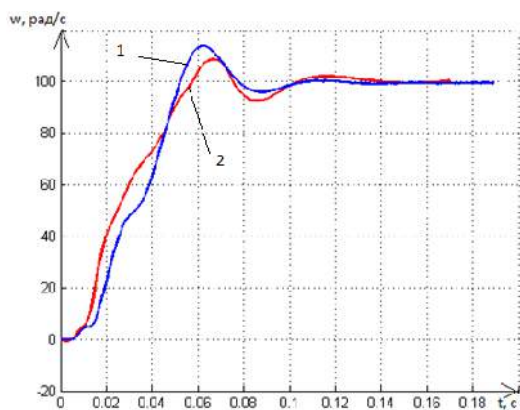


Рис. 1

Для проверки достоверности результатов, получаемых с использованием данной модели, реализованной с учетом эффекта вытеснения тока, был проведен расчет прямого пуска АД 4А112МА6УЗ, $P_n = 3$ кВт; $n_n = 950$ об/мин; $U_n = 220/380$ В;

КПД = 81%; $\cos\phi = 0,76$; $J = 0,017$ кг·м². На рис. 1 приведены расчетные 1 и экспериментальные 2 зависимости скорости электродвигателя от времени, показывающие приемлемую точность для практического использования при развитии математической модели электропривода механизма сновального вала.

ВЫВОДЫ

Разработанная на основе многомерной сплайновой аппроксимации результатов серии расчетов магнитного поля математическая модель АД позволяет учитывать необходимые в процессе оптимизации энергетических характеристик электропривода сновальной машины нелинейности и вариацию параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов В.Ф., Виноградов А.Б., Шишков К.С. Асинхронный электропривод механизма формирования сновальных валов // Вестник ИГЭУ. – 2011, № 1. С. 83...87.
2. Кулида Н.А. Теоретические основы повышения эффективности партионного снования. – Иваново: ИГТА, 2003.
3. Глазунов В.Ф., Шишков К.С. Минимизация потерь мощности в асинхронном электроприводе механизма намотки сновальных валов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 2. С.129...133.
4. Булатов Л.Н. Автоматизация проектирования асинхронных машин с использованием полевых динамических моделей: Дис...канд. техн. наук. – Иваново, 2013.
5. Булатов Л.Н., Тихонов А.И. Разработка динамической модели асинхронной машины с использованием результатов конечно-элементного расчета // Вестник ИГЭУ. – 2012, Вып. 4. С. 32...34.
6. Тихонов А.И., Булатов Л.Н. Платформенезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – №2011614852. Заявка № 2011613040, приоритет от 28.04.2011, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2011.

Рекомендована кафедрой физики. Поступила 28.10.14.