

Электромагнитный момент индукторной машины

БАЛЬ В.Б., ТАН ТХУН АУНГ

Представлена инженерная методика уточненного расчета динамического момента индукторной машины, которая позволяет учитывать насыщение магнитной цепи без текущих расчетов магнитной цепи. Получено аналитическое выражение динамического момента индукторной машины, учитывающее насыщение магнитной цепи. Необходимые для уточненного расчета динамического момента коэффициенты определяются на основе предварительных статических расчетов магнитной цепи машины.

Ключевые слова: индукторная машина, магнитная цепь, магнитное поле, момент

Индукторные машины находят применение во многих областях техники. Индукторные генераторы используются в автономных системах электропитания в качестве возбудителей синхронных генераторов. Индукторные генераторы находят применение в малой гидро- и ветроэнергетике. Индукторные двигатели и до настоящего времени применяются в шаговом электроприводе. В последнее время расширяется применение индукторных двигателей в силовом приводе (вентильно-индукторные двигатели). Преимущество индукторных машин: простота и надежность конструкции, технологичность конструкции и низкая стоимость изготовления.

Расчет момента индукторной машины как машины с двойной зубчатостью традиционно проводится на основе анализа энергетических преобразований в зубцовой зоне. При вращении ротора индукторной машины периодически меняется взаимное расположение зубцов статора и ротора от согласованного положения, когда зубцы ротора расположены напротив части зубцов статора, до рассогласованного положения, когда зубцы ротора расположены напротив пазов статора. При этом магнитная проводимость воздушного зазора машины меняется от максимального значения I_{\max} (согласованное положение зубцов статора и ротора) до минимального I_{\min} (рассогласованное положение). Возбуждение зубцовой зоны статора вызывает магнитный поток, значение которого меняется при изменении взаимного расположения зубцов статора и ротора от максимального значения Φ_{\max} до минимального Φ_{\min} в соответствии с изменением магнитной проводимости. Аналогично меняется

An engineering procedure for calculating the dynamic torque of an inductor machine is presented the use of which makes it possible to take into account saturation of the machine's magnetic circuit without carrying out current calculations of the magnetic circuit. An analytical expression for the dynamic torque of an inductor machine is obtained that takes saturation of the magnetic circuit into account. The coefficients required for more exact calculation of the dynamic torque are determined on the basis of preliminary steady-state calculations of the machine's magnetic circuit

Key words: inductor machine, magnetic circuit, magnetic field, torque

значение энергии магнитного поля воздушного зазора.

Вывод уравнения момента индукторной машины базируется на уравнении баланса мощностей фазы машины [1]:

$$UI = I^2 R + I \frac{dy}{dt}, \quad (1)$$

где U , I , R и y – напряжение, ток, сопротивление и потокосцепление фазы индукторной машины соответственно.

В соответствии с (1) мощность UI , поступающая из сети, равна сумме потерь мощности на активном сопротивлении фазы и электромагнитной мощности. Поскольку электромагнитная мощность расходуется на изменение энергии магнитного поля и создание механической работы, можно написать

$$I \frac{dy}{dt} = \frac{dW_{\text{мех}}}{dt} + \frac{dW_{\text{маг}}}{dt} = M \frac{dq}{dt} + \frac{dW_{\text{маг}}}{dt}, \quad (2)$$

где M – момент; dq/dt – угловая скорость вращения ротора; $W_{\text{мех}}$ – механическая работа; $W_{\text{маг}}$ – энергия магнитного поля.

Из (2) можно получить выражение момента индукторной машины [2]:

$$M = I \frac{dy}{dq} - \frac{dW_{\text{маг}}}{dq}, \quad (3)$$

где q – угловое положение ротора.

Момент индукторной машины может быть определен через коэнергию системы, которая связана с магнитной энергией системы соотношением

$$W_k = Iy - W_{\text{маг}}. \quad (4)$$

Продифференцировав (4) по угловому перемещению q , можно получить выражение связи между производными магнитной энергии и коэнергии системы:

$$\frac{dW_k}{dq} = y \frac{dI}{dq} + I \frac{dy}{dq} - \frac{dW_{\text{маг}}}{dq}. \quad (5)$$

При подстановке (5) в (3) получим выражение момента индукторной машины в зависимости от коэнергии системы:

$$M = \frac{dW_k}{dq} - y \frac{dI}{dq}. \quad (6)$$

Аналитическое решение уравнений (3) и (6) возможно только в линейной системе. При отсутствии насыщения энергия магнитного поля и коэнергия одинаковы и равны $yI/2$. Производная магнитной энергии (или коэнергии) по перемещению равна $(y dI/dq + I dy/dq)/2$. Таким образом, в линейной системе уравнения (3) и (6) приводятся к виду [3]:

$$M = \frac{1}{2} I \frac{dy}{dq} - y \frac{dI}{dq}. \quad (7)$$

Потокосцепление фазы и ток связаны выражением $y = LI$ (L — индуктивность фазы). В линейной системе индуктивность фазы L зависит только от углового положения ротора q . Поэтому для линейной системы выражение (7) можно записать в виде [4]:

$$M = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dq}. \quad (8)$$

При учете только первой гармонической составляющей изменения индуктивности фазы индукторной машины ($L = L_0 + L_1 \sin q$, где L_0 и L_1 — постоянная и переменная составляющие индуктивности) момент представляется в виде

$$M = \frac{1}{2} I^2 L_1 \cos q. \quad (9)$$

Уравнения (7) и (8) могут быть использованы для расчета как статического момента индукторной машины, так и динамического при моделировании переходных процессов. Насыщение не учитывается.

В нелинейной системе связь потокосцепления y с током I определяется кривой намагничивания (рис. 1). Энергия магнитного поля в системе для заданных потокосцепления y и тока I определяется интегралом

$$W_{\text{маг}} = \int_0^{y_1} \dot{I}(y, q) dy. \quad (10)$$

На рис. 1 заштрихованная площадь соответствует интегралу (10). В общем случае определение момента для нелинейной системы по выражению (3) является достаточно трудоемкой задачей. Поэтому в большинстве работ, посвященных преобразованию энергии в нелинейной системе, рекомендуется упростить задачу и рассчитывать момент при постоянном потокосцеплении [4]. Действительно, если $y = \text{const}$, первый член уравнения (3) обращается в нуль и для определения момента требуется найти только изменение магнитной энергии. Пусть на рис. 1 потокосцепление y_1 постоянно. Кривые намагничивания OA и OB соответствуют двум различным угловым положениям ротора q . Тогда магнитная энергия для двух угловых положений будет соответствовать площадям криволинейных треугольников OAy_1 и OBy_1 соответственно. Площадь криволинейного треугольника OAB будет соответствовать разности магнитной энергии в системе при изменении углового положения q и, следовательно, произведенной при этом механической работе. К сожалению, постоянство потокосцепления является частным случаем и в реальной магнитной системе наблюдается не всегда.

На рис. 1 коэнергия соответствует площади треугольника OAI_1 для кривой намагничивания OA и площади треугольника OBI_2 для кривой намагничивания OB . Коэнергия в нелинейной системе может быть определена с помощью интеграла

$$W_k = \int_0^I \dot{y}(I, q) dI. \quad (11)$$

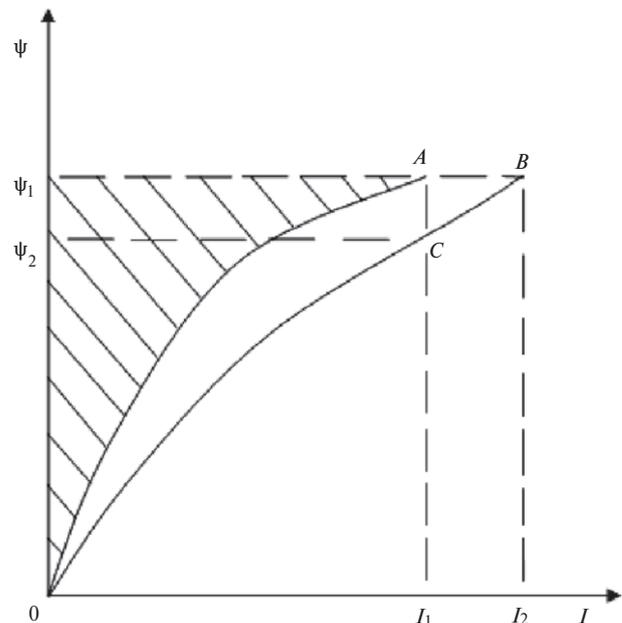


Рис. 1. К расчету магнитной энергии зубцовой зоны индукторной машины

Для нелинейной системы часто рекомендуют упростить задачу и рассчитывать момент при постоянном токе фазы I [4]. Действительно, если $I = \text{const}$, второй член уравнения (6) обращается в нуль и для определения момента требуется найти только изменение коэнергии dW_{κ} . Считаем ток фазы I_1 постоянным (рис. 1), тогда коэнергия для двух угловых положений будет соответствовать площадям криволинейных треугольников $0AI_1$ и $0CI_1$ соответственно. Площадь криволинейного треугольника $0AC$ будет соответствовать разности коэнергии в системе при изменении углового положения q и, следовательно, проведенной при этом механической работе. Как и в случае с постоянным потокосцеплением, постоянство тока тоже является частным случаем и в реальной магнитной системе наблюдается не всегда.

Выражение момента через энергию или коэнергию не всегда удобно, так как требует расчета магнитной энергии системы в каждый момент времени. Более удобно выразить момент через токи и потокосцепления, как в случае линейной системы. Для этого следует ввести коэффициент $x = W_{\text{маг}} / Iy$, определяющий отношение магнитной энергии к полной энергии системы. После подстановки x в (3) и дифференцирования получим выражение момента в виде

$$M = I \frac{dy}{dq} - \sum_{\xi} x I \frac{dy}{dq} + xy \frac{dI}{dq} + Iy \frac{dx}{dq} \frac{\partial}{\partial \xi} \quad (12)$$

Производная $\frac{dx}{dq}$ является членом высшего порядка малости по сравнению с производными тока и потокосцепления, и последним членом этого уравнения можно пренебречь, тогда

$$M = (1 - x)I \frac{dy}{dq} - xy \frac{dI}{dq}. \quad (13)$$

Выражение (13) можно использовать для расчета момента индукторной машины как в статических, так и динамических переходных режимах. Коэффициент x может быть определен по кривым намагничивания при использовании выражения (10).

Для определения x использовалось численное моделирование магнитного поля. Моделирование проводилось с помощью программы FEMM. Расчет магнитного поля зубцовой зоны с двойной зубчатостью проводился для различных взаимных расположений статора и ротора. Электрический угол q менялся от 0 (согласованное положение зубцов статора и ротора) до 180° (рассогласованное положение зубцов); зубцовое деление $t = 4$ мм; относительное значение рабочего зазора $d/t = 10$; относи-

тельная ширина зубцов $b_z/t = 0,5$; относительная высота зубцов $h_z/t = 0,5$. Характеристика намагничивания магнитного материала соответствовала кривой намагничивания электротехнической стали 2412. Определялся магнитный поток зубцового деления Φ для различных МДС зубцовой зоны F_{dz} .

По результатам расчетов построено семейство характеристик намагничивания зубцовой зоны для различных взаимных положений статора и ротора (рис. 2). На рис. 3 приведены зависимости энергии

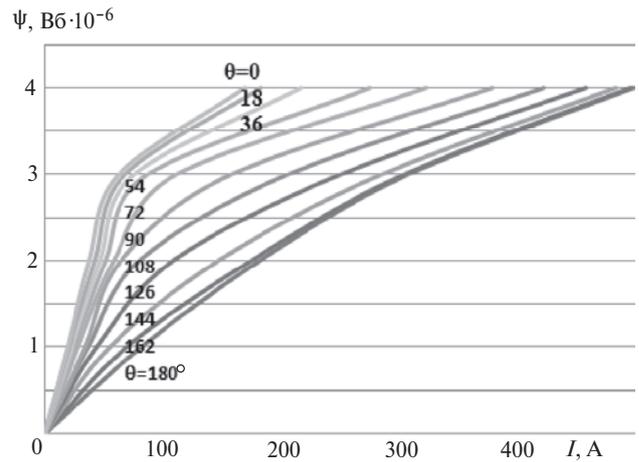


Рис. 2. Кривые намагничивания зубцовой зоны индукторной машины

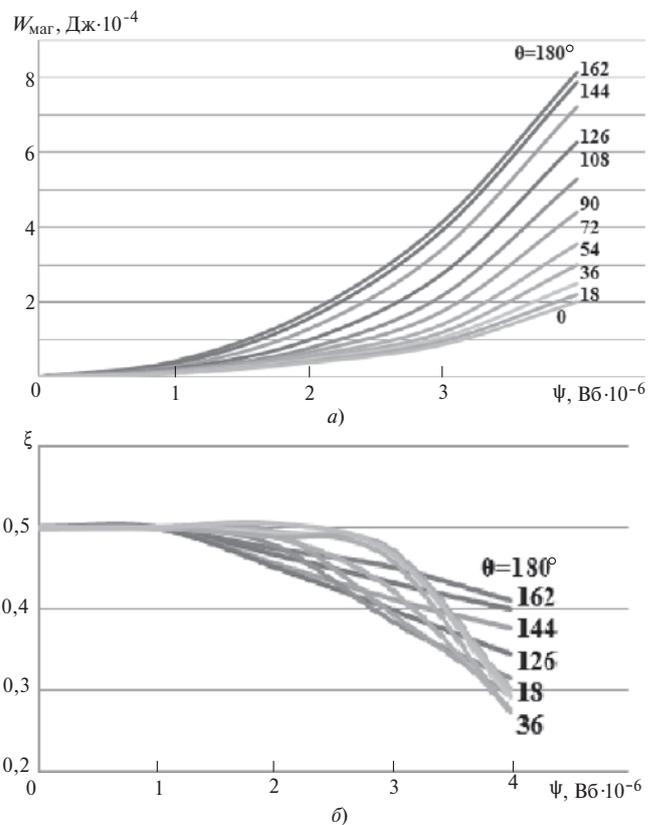


Рис. 3. Зависимости магнитной энергии зубцовой зоны индукторной машины (а) и зависимости отношения магнитной энергии к полной энергии системы x от потокосцепления фазы y и электрического угла q (б)

магнитного поля зубцовой зоны и коэффициента x от магнитного потокосцепления y для различных значений электрического угла.

Значения x можно использовать для расчета динамического момента по уравнению (12). Важно, что определение x проводится на основе статических расчетов магнитной цепи, поэтому для моделирования динамических процессов возможно создание базы значений x , которые легко использовать для расчета динамического момента. Выражение (12) можно использовать при моделировании динамических процессов в индукторных машинах, например в системе Matlab-Simulink, а также для регистрации динамического момента индукторной машины в процессе испытаний или эксплуатации вентильно-индукторного привода. В последнем случае достаточно регистрировать только ток I и ЭДС фазы машины E ($E = \frac{dy}{dq}$). Потокосцепление y и $\frac{dI}{dq}$ могут быть определены в процессе текущих вычислений.

Вывод. Предлагаемый метод расчета динамического момента индукторной машины позволяет учитывать насыщение магнитной цепи машины без текущих расчетов магнитной цепи. Необходимые для уточненного расчета динамического момента коэффициенты определяются на основе предварительных статических расчетов магнитной цепи машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. — М.: Энергия, 1964.
2. DiRenzo M.T. Switch Reluctance Motor Control – Basic Operation and Example Using the TMS320F240. — Texas Instruments, Application Report SPRA420A, February 2000.
3. Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов/Под редю Ю.К. Розанова. 2-е изд., испр. и доп. — М.: Информэлектро, 2001.
4. Кузнецов В.А., Кузмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. — М.: Изд-во МЭИ, 2003.

Авторы: Баль Владимир Борисович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1976 г. В 1982 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование линейных шаговых электродвигателей». Доцент кафедры электромеханики НИУ «МЭИ».

Тан Тхун Аунг (Мьянма) окончил магистратуру МЭИ в 2010 г. Аспирант кафедры электромеханики НИУ «МЭИ».