

УДК 621.313

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
МАШИНЫ С МНОГОФАЗНОЙ ДРОБНОЙ ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ
METHOD FOR DETERMINING INDUCTIVE PARAMETERS OF ELECTRIC
MACHINE WITH MULTI-PHASE FRACTIONAL TOOTH WINDING

Пантелеев С.В., Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
S. Panteleev, A. Malashin, Cand. tech. Sciences, Associate Professor,
Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus
S. Sizikov, Candidate of Technikal Sciences
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Разработан способ расчета индуктивных параметров синхронной электрической машины с многофазной дробной зубцовой обмоткой, который позволяет с высокой достоверностью определить влияние схемы и параметров обмотки, несинусоидальный закон изменения пространственных обмоточных функций, и высшие гармоники индукции магнитного поля в воздушном зазоре на индуктивные параметры электрической машины при наименьших временных затратах.

Abstract. A method for calculating the inductive parameters of a synchronous electric machine with a multiphase fractional toothed winding has been developed, which makes it possible to determine with high reliability the influence of the circuit and winding parameters, the non-sinusoidal law of variation of the spatial winding functions, and the higher harmonics of the magnetic field induction in the air gap on the inductive parameters of the electric machine at the smallest time costs.

Ключевые слова: индуктивность, многофазная, дробная зубцовая, обмотка, электрическая машина.

Key words: inductance, multiphase, fractional slot, winding, electric machine.

ВВЕДЕНИЕ

Существующими методами определения индуктивных параметров электрических машин, которые учитывают высшие пространственные гармоники магнитного поля в воздушном зазоре, геометрические параметры магнитной системы, распределение фазных обмоток независимо от числа фаз, являются: метод гармонических проводимостей, метод проводимостей зубцовых контуров, метод интегральных уравнений. Но использование таких подходов в процессе оптимизации синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками (СЭМ с ДЗО) с различными соотношениями чисел зубцов на полюс и фазу является слишком трудоемким.

Наличие корректной информации об индуктивных параметрах электрической машины необходимо как для разработки адекватной математической модели

СЭМ с ДЗО, так и для решения задач синтеза систем управления. Поэтому разработка удобного для процесса оптимизации электрической машины способа определения собственных и взаимных индуктивностей многофазных СЭМ с ДЗО, который учитывает несинусоидальное распределение фазных обмоток в пазах магнитопровода статора и спектр пространственных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре, является актуальной задачей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для моделирования влияния схемы и параметров обмотки на вращающееся магнитное поле в воздушном зазоре электрической машины используется пространственная обмоточная функция (ПОФ) $Q_n(\phi_s)$. Гармонический состав ПОФ определяет: характер распределения МДС обмотки вдоль воздушного зазора; фильтрующие свойства обмотки как источника ЭДС по отношению к высшим пространственным гармоникам магнитного поля; индуктивные параметры электрической машины.

Производная пространственной обмоточной функции определяет функцию распределения обмотки (ФРО) $D_n(\phi_s)$.

Функция распределения обмотки непрерывна, однако с учетом того, что при увеличении числа фаз m увеличивается число пазов магнитопровода статора z_1 , можно принять допущение о дискретном характере функции распределения и использовать дискретную модель многофазной обмотки электрической машины. Основой для разработки дискретной модели обмотки электрической машины в матричном виде является введение двух матриц: матрицы функции распределения обмотки и матрицы пространственной обмоточной функции [1]:

$$[D] = (d_{kn}) = (\bar{d}_0 \quad \dots \quad \bar{d}_n \quad \dots \quad \bar{d}_{m-1}), \quad k \in [0, z_1 - 1], \quad n \in [0, m - 1], \quad (1)$$

$$[W] = (w_{kn}) = (\bar{w}_0 \quad \dots \quad \bar{w}_n \quad \dots \quad \bar{w}_{m-1}), \quad k \in [0, z_1 - 1], \quad n \in [0, m - 1], \quad (2)$$

где d_{kn} – доля проводников пазы статора k , которая принадлежит фазе n ;

\bar{d}_n – вектор распределения обмотки фазы n ;

w_{kn} – дискретное значение ПОФ фазы n справа от пазы статора с номером k ;

\bar{w}_n – вектор-столбец дискретных значений ПОФ фазы n .

В матрице ФРО (1) компонент k вектора n соответствует дискретному значению функции распределения в пазу статора с номером k . При условии протекания постоянного тока в фазных обмотках, проводники в пазу статора с положительным направлением тока являются прямыми, а с отрицательным направлением тока – обратными. С учетом этого d_{kn} могут принимать следующие значения: $d_{kn} \in (0, 1]$, если это доля прямых проводников; $d_{kn} \in [-1, 0)$, если это доля обратных проводников.

Выражение дискретного интегрирования (3) позволяет определить компоненты матрицы пространственной обмоточной функции из матрицы функции распределения обмотки:

$$w_{k,n} = \sum_{g=0}^k d_{g,n} - \frac{1}{z_1} \sum_{j=0}^{z_1-1} \sum_{h=0}^j d_{h,n}, \quad k \in [0 \dots z_1 - 1], n \in [0 \dots m - 1], \quad (3)$$

где $g, j, h \in Z$ – переменные.

На основе известных значений компонентов матриц ФРО и ПОФ можно представить функцию распределения обмотки $D_n(\phi_s)$ и пространственную обмоточную функцию $Q_n(\phi_s)$ для фазы n в дискретной форме:

$$D_n(\phi_s) = \frac{W_{z_1}}{R_s \sigma_s} \sum_{k=0}^{z_1-1} d_{kn} S_{\sigma_s} \left(\phi_s - \frac{\pi}{z_1} - k \frac{2\pi}{z_1} \right), \quad (4)$$

$$Q_n(\phi_s) \approx W_{z_1} \sum_{k=0}^{z_1-1} w_{kn} S_{\tau} \left(\phi_s - k \frac{2\pi}{z_1} \right), \quad (5)$$

где W_{z_1} – количество проводников внутри паза статора (принято равным для всех пазов статора);

σ_s – величина открытия паза магнитопровода статора;

S_{σ_s} – функция открытия паза магнитопровода статора;

$\tau = 2\pi/z_1$ – величина зубцового (пазового) деления статора;

S_{τ} – функция зубцового (пазового) деления статора;

ϕ_s – угол между началом отсчета и рассматриваемой точкой на статоре;

R_s – радиус магнитопровода статора у воздушного зазора.

Выражения (4) и (5) представляют собой аналитическую модель многофазной зубцовой обмотки, которая позволяет с высокой достоверностью определить влияние схемы и параметров обмотки на индуктивные параметры электрической машины при наименьших временных затратах.

С использованием данной модели разработан способ определения индуктивных параметров синхронной электрической машины с многофазной дробной зубцовой обмоткой, который позволяет учесть высшие гармоники индукции магнитного поля в воздушном зазоре и несинусоидальный закон изменения пространственных обмоточных функций.

Проверку адекватности аналитических выражений для определения индуктивных параметров электрической машины корректно проводить в сравнении с результатами расчета посредством магнитостатической векторной модели магнитного поля электрической машины. Расчет значений собственных и взаимных индуктивностей статора рассмотрен на примере девятифазной синхронной электрической машины с двухслойной дробной зубцовой обмоткой с числом пазов на полюс и фазу $q = 2/17$ [2].

В таблице 1 приведены результаты расчета собственных и взаимных индуктивностей статора электрической машины посредством аналитического метода и численного метода конечных элементов.

Таблица 1 – Результаты расчета индуктивностей статора СЭМ с ДЗО

Метод	L_0 , мГн	M_1 , мГн	M_2 , мГн	M_3 , мГн	M_4 , мГн
Аналитический	0,408	0	0	0	0,027
Численный	0,419	0	0	0	0,029

Из таблицы 1 видно, что расхождение результатов, полученных посредством аналитического и численного методов, не превышает 10 %. Это подтверждает адекватность разработанных аналитических выражений для определения индуктивных параметров электрической машины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значимость разработанного способа определения индуктивных параметров заключается в возможности с высокой достоверностью определить влияние схемы и параметров обмотки на индуктивные параметры электрической машины при наименьших временных затратах. Поэтому разработанный способ может быть использован в процессе оптимизации СЭМ с ДЗО.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Sculler, E. Semail, J.F. Charpentier, General modeling of the windings for multi-phase ac machines, Eur. Phys. J. -Appl. Phys., vol. 50, no. 3, pp. 1–15, 2010.
2. Пантелеев, С.В. Повышение энергетических показателей электрической машины путем применения многофазной зубцовой обмотки / С.В. Пантелеев, А.Н. Малашин // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск. – 2017 – № 3. – С. 80–86.