

УДК 621.313.322

А.Б. Серов, А.Б. Цукублин, А.Г. Гарганеев

Определение связи между числами пазов статора и полюсов ротора вентильного магнитоэлектрического двигателя методом планирования эксперимента

Методом планирования эксперимента установлена связь между электромагнитным моментом, числом пазов статора, полюсов ротора и значением коэрцитивной силы магнитов вентильного магнитоэлектрического двигателя (ВД) в виде аппроксимирующих функций. Выполнена проверка адекватности аппроксимирующих функций.

Ключевые слова: вентильный магнитоэлектрический двигатель (ВД), момент вращения, планирование эксперимента.

В настоящее время для бесконтактных регулируемых электроприводов применяются вентильные двигатели постоянного тока на базе синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов, питаемые от инвертора. Благодаря высокой надёжности и хорошей управляемости, вентильные двигатели применяются в широком спектре приложений: от компьютерных вентиляторов и CD/DVD-приводов до роботов и космических ракет. Широкое применение ВД нашли в промышленности, особенно в системах регулирования скорости с большим диапазоном и высоким темпом пусков, остановок и реверса; авиационной технике, автомобильном машиностроении, биомедицинской аппаратуре, бытовой технике. Одной из частных задач конструирования машин магнитоэлектрического исполнения является проектирование синхронных трехфазных исполнительных многополюсных двигателей. Наличие неотключаемого магнитного потока индуктора в синхронных магнитоэлектрических машинах требует иного подхода к конструктивному исполнению машины и особенно к соотношению числа зубцов якоря и числа полюсов индуктора. Так в многополюсных электродвигателях с зубцовым слоем статора, при ограничении радиального размера, правильный выбор размеров зубцов, их числа и числа полюсов ротора может привести к увеличению вращающего момента, уменьшению пульсации магнитного потока, уменьшению потерь и повышению КПД. Особую актуальность приобретает эта проблема в маломощных вентильных двигателях постоянного тока на базе трехфазных синхронных двигателей. В этих машинах плохо подобранное соотношение чисел зубцов и полюсов ротора при применении высококоэрцитивных магнитов приводит к появлению значительных реактивных моментов (моментов залипания) и к снижению момента при пуске, что существенно влияет на мощность силовых преобразовательных устройств и пульсации вращающих моментов [3].

Исследования по влиянию числа пазов статора (Z_1), полюсов ротора ($2P$) и величины коэрцитивной силы магнитов (H_c) синхронной машины (ВД) с явно выраженными зубцами статора на её выходные характеристики [3] проводились путем моделирования с помощью программного обеспечения ANSYS Maxwell 2D. Расчёт момента вращения в среде ANSYS Maxwell 2D осуществлялся путем дифференцирования величины энергии магнитного поля в воздушном зазоре машины по углу поворота ротора. Момент вращения двигателя складывается из электромагнитного момента (полезного момента) и момента реактивного (момента залипания). Модель в среде Maxwell является динамической и представлена системой интегрированных дифференциальных уравнений, которые, в свою очередь показывают изменение состояния электромеханического объекта (ВД) во времени при наличии управляющих воздействий.

Электромеханические характеристики объекта обычно связаны с параметрами через сложные уравнения, отражающие действия ряда физических законов и конструктивного исполнения, через уравнения магнитных полей и электрических цепей, поэтому прямую связь между соотношением чисел пазов статора, полюсов ротора и значением коэрцитивной силы магнитов установить достаточно сложно. Одним из методов получения таких прямых связей является аппроксимация сложных математических связей, выраженных в большом количестве интегрированных дифференциальных уравнений методом планирования эксперимента с определённой точностью и на определенном интервале [1].

Применяя этот метод, точность полученных результатов остается на уровне модели в вычислительном комплексе ANSYS Maxwell 2D, а полиномиальная связь даёт лишь количественную взаимосвязь между параметрами в заданном диапазоне, точность которого определяется адекватностью полученных выражений.

Проведенный анализ показал, что для аппроксимации взаимосвязи между результирующим моментом (y), числом полюсов ротора ($2P$), пазов статора (Z_1) и качеством магнитов (H_c) можно воспользоваться (первое приближение) линейной взаимосвязью, поэтому для обработки экспериментов был выбран линейный план первого порядка. При расчетах основные геометрические размеры, внешний и внутренний диаметры, фазное напряжение, коэффициент полюсного перекрытия (α_n) при изменении числа полюсов оставались постоянными. Все остальные параметры вычислялись автоматически в процессе моделирования [3].

Для проведения экспериментов использовали матрицу планирования первого порядка (табл. 1) в кодовых единицах (1):

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x} \quad (1)$$

Таблица 1

Матрица планирования первого порядка

| N эксперимента | X_0 | X_1 | X_2 | X_3 | $X_1 \cdot X_2$ | $X_1 \cdot X_3$ | $X_2 \cdot X_3$ | $X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$ |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 1 | 0 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 2 | 0 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 5 | 0 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 6 | 0 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 7 | 0 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 8 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

В качестве центра плана была выбрана точка X_0 , соответствующая максимальным значениям момента вращения ($2P = 12$, $Z_1 = 24$, $H_c = 855$ кА/м). Диапазоны изменения значений каждой из переменных выбираются из следующих соображений:

$\Delta x_1 = 4$ – диапазон изменения числа полюсов, выбран из условий выполнимости машины и возможности расчета (дискретности изменения числа полюсов).

$\Delta x_2 = 6$ – диапазон изменения числа зубцов, выбран из условий возможности выполнения обмотки статора двигателя.

$\Delta x_3 = 100$ кА/м – определяется коэрцитивной силой возможных к применению постоянных магнитов.

С учетом этих данных и табл. 1 эксперимент (моделирование) был проведен в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Данные для проведения эксперимента

| N эксперимента | X_1 ($2P$ – число полюсов ротора) | X_2 (Z_1 – число пазов статора) | X_3 (H_c – коэрцитивная сила магнитов), кА/м | y (M_d – момент вращения), Н·м |
|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|-------------------------------------|
| 1 | 8 | 18 | 750 | 3,59 |
| 2 | 16 | 18 | 750 | 8,71 |
| 3 | 8 | 30 | 750 | 3,63 |
| 4 | 16 | 30 | 750 | 6,42 |
| 5 | 8 | 18 | 955 | 2,4 |
| 6 | 16 | 18 | 955 | 8,90 |
| 7 | 8 | 30 | 955 | 2,17 |
| 8 | 16 | 30 | 955 | 7,72 |

Далее представлена обработка результатов эксперимента. Был выполнен регрессионный анализ на основании зависимости (2) [2] и табл. 1:

$$b_i = \frac{\sum_{iu}^N x_{iu} \cdot y_{iu}}{N}, \quad (2)$$

где b_1, b_2, \dots, b_i – коэффициенты регрессии (индекс i обозначает номер столбца в матрице планирования); x_1, x_2, \dots, x_i – независимые переменные; y_1, y_2, \dots, y_i – величины момента вращения, полученные с помощью числового эксперимента; N – количество экспериментов.

Расчет среднего значения момента вращения (центральная точка плана) определялся согласно выражению (3) [1] и составил 5,445 Н·м (4):

$$b_0 = \frac{1}{8} \sum_{iu}^8 y_{iu} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8}{8}, \quad (3)$$

$$b_0 = \frac{1}{8} \frac{\sum_{iu}^8 y_{iu} \quad 3,59 + 8,71 + 3,62 + 6,42 + 2,43 + 8,89 + 2,17 + 7,72}{8} = 5,445. \quad (4)$$

В результате были получены значения коэффициентов $b_1 \dots b_{123}$:

$$b_1 = 2,49; b_2 = -0,461; b_3 = -0,142; b_{12} = -0,405; b_{13} = 0,515; b_{23} = 0,105; b_{123} = 0,175.$$

Уравнение для значений момента вращения было определено по выражению (5):

$$Md = 2,49 \cdot X_1 - 0,46 \cdot X_2 - 0,14 \cdot X_3 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,5 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,105 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,175 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 5,445. \quad (5)$$

Для проверки адекватности аппроксимирующей функции, когда $S^2_{y \text{ об}} \approx 0$, было необходимо задаться допустимой погрешностью аппроксимации $\Delta Y_{\text{доп}}$ и считать аппроксимацию адекватной, если её погрешность $|Y - \hat{Y}|$ в точках плана в ряде контрольных точек не превосходит $\Delta Y_{\text{доп}}$. Была принята $\Delta Y_{\text{доп}} = 5\%$, что соответствует требованиям инженерных расчетов [2]. Для рассматриваемого двигателя $\Delta Y_{\text{доп}} = 5\%$ от $y_{\text{max}} = (8,9 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot 5\%) / 100\% = 0,45 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Таблица 3

Значения отклонений момента вращения

| N эксперимента | y (M_d – момент вращения), Н·м | $ Y - \hat{Y} $ (отклонение момента вращения), Н·м |
|------------------|-------------------------------------|--|
| 1 | 3,59 | 0,032 |
| 2 | 8,71 | 0,172 |
| 3 | 3,63 | 0,394 |
| 4 | 6,42 | 0,196 |
| 5 | 2,4 | 0,156 |
| 6 | 8,90 | 0,236 |
| 7 | 2,17 | 0,182 |
| 8 | 7,72 | 0,388 |

Максимальное расхождение 0,388 Н·м не превосходит 0,45 Н·м, следовательно, всеми произведениями факторов $X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$ можно пренебречь.

Для конечного решения требовалось определение значимости произведений факторов X_1, X_2 и X_3 на значение величины Md с учетом допустимой погрешности 5% от $y_{1\text{max}}$. В этом случае формула для расчета значений момента вращения примет вид (6):

$$Md = 2,49 \cdot X_1 - 0,46 \cdot X_2 - 0,14 \cdot X_3 + 5,445. \quad (6)$$

Уравнение для расчета значений момента вращения вентильного магнитоэлектрического двигателя в конечном виде (7):

$$Md = 0,623 \cdot 2P - 0,077 \cdot Z1 - 0,0014 \cdot Hc + 1,012. \quad (7)$$

Заключение. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Полученная взаимосвязь между моментом вращения, количеством пазов статора, полюсов ротора и величиной коэрцитивной силы магнитов в виде аппроксимирующих функций показывает, что при требуемой величине момента вращения M_d двигателя и заданной коэрцитивной силе магнитов Hc можно подобрать необходимые соотношения $2P$ и $Z1$, которые связаны между собой через число пазов на полюс и фазу $q = Z1/2P \cdot m$. При $q = 3/8$ для данного типоразмера двигателя [3] реак-

тивный момент практически отсутствует. Также необходимо учитывать возможность реализации схемы обмотки статора.

2. Увеличение коэрцитивной силы магнитов H_c не всегда приводит к увеличению момента вращения M_d , что связано с увеличением реактивного момента (момента залипания) двигателя.

Литература

1. Ивоботенко Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский, И.П. Копылов. – М.: Энергия, 1975. – С. 9–64.
2. Налимов В.В. Статические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – С. 39–43.
3. Серов А.Б. Моделирование магнитоэлектрического двигателя с использованием программных продуктов ANSYS [Электронный ресурс] / А.Б. Серов; науч. рук. А.Б. Цукублин // Современная техника и технологии: сб. трудов XX Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14–18 апреля 2014 г.: в 3 т. – Т. 1. – Томск: НИТПУ, 2014. – С. 267–268.

Серов Александр Борисович

Аспирант каф. электротехнических комплексов и материалов (ЭКМ)
Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ)
Тел.: 8 (382-2) 56-34-53
Эл. почта: sabtpu@gmail.com

Цукублин Анатолий Борисович

Канд. техн. наук, доцент каф. ЭКМ
Тел.: 8 (382-2) 56-34-53
Эл. почта: cukub@mail.ru

Гарганеев Александр Георгиевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ЭКМ
Тел.: 8 (382-2) 56-34-53
Эл. почта: garganeev@rambler.ru

Serov A.B., Tsukublin A.B., Garganeev A.G.

Determination of constraint between a ratio of numbers of stator slots and rotor poles in a self-controlled synchronous magnetoelectric motor by an experiment planning method

By means of the experiment planning method we determined the constraint between a ratio of numbers of stator slots, rotor poles and value of coercive force of magnets of the self-controlled synchronous magnetoelectric motor. We defined the factor of the greatest impact on value of the electromagnetic torque of the self-controlled synchronous magnetoelectric motor. We checked adequacy of approximating functions.

Keywords: self-controlled synchronous magnetoelectric motor, electromagnetic torque, experiment planning.
