

УДК 62-83

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ С
ПОПЕРЕЧНЫМ ПОЛЕМ**

Р.Б. Мирзалиев, Д.В. Бажугин

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

В статье приведено краткое описание двигателей с поперечным полем, один из подходов к их моделированию и особенности регулирования скорости вращения.

***Ключевые слова:** двигатель с поперечным полем, математическая модель, Matlab*

This paper presents a short review on transverse flux motors, one approach to simulating them and velocity control distinctions.

Keywords: transverse flux motor, mathematical model, Matlab

Так как в этом исследовании, объект с модулем статора с двойной обмоткой снаружи и одним модулем ротора внутри создавая математическую модель двигателя с поперечным полем мы можем разделить его на две части, первая часть это внешний статор, вторая часть внутренний статор. При подаче питающего напряжения на обе части статора магнитное поле влияет на ротор сонаправленно. Из этого следует что, момент на валу двигателя это сумма сил моментов развиваемых внешним и внутренним статором. Фактически мы моделируем два идентичных двигателя сумма показателей которых будет давать нам показатели нашего объекта.

Ротор двигателя имеет постоянные магниты, а это дает ряд преимуществ перед конкурирующими тяговыми электродвигателями:

1) пониженные затраты реактивной энергии на создания магнитного поля;

2) Колебания напряжения в сети в меньшей степени воздействуют на двигатель. Максимальный момент пропорционален напряжению сети;

3) Высокая перегрузочная способность. Путем повышения тока возбуждения, можно провести значительное повышение перегрузочной способности. Это происходит на момент резкого и кратковременного возникновения дополнительной нагрузки на выходном валу.

Но это зачастую существенно увеличивает стоимость двигателя, это связано с сложностью и за частую невозможностью приобретения сильных постоянных магнитов так как они сделанные из сплавов редкоземельных элементов монополистом которых является Китай. Наиболее часто используемыми редкоземельными металлами, применяемыми в магнитах, являются неодим и самарий.

На рис. 1 показано схематическое устройство двигателя с поперечным полем.

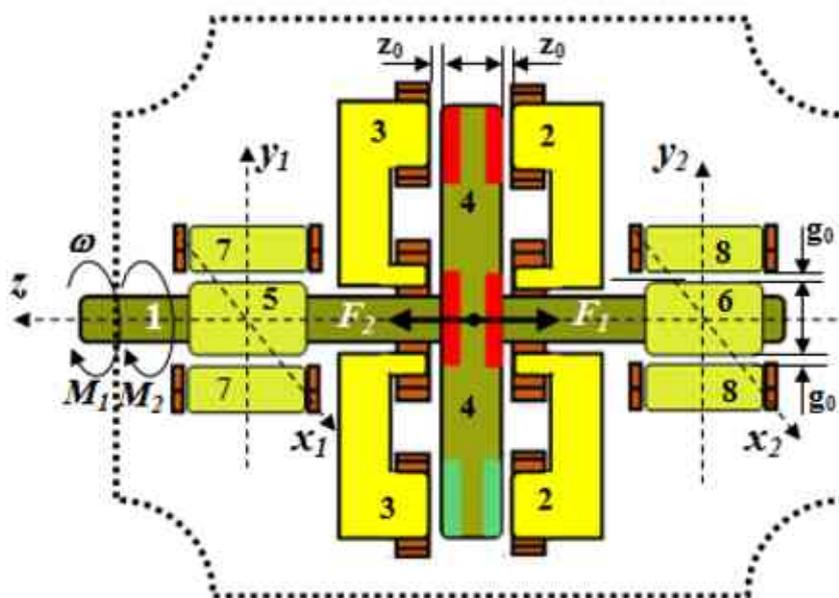


Рис. 1 – Структура двигателя с поперечным полем и магнитным подшипником на обоих концах [1]

На рисунке 1 приняты обозначения:

1 – вал; 2,3 – статор и обмотка с левой стороны и правой стороны двигателя; 4 – ротор электродвигателя с постоянными магнитами; 5,6 – магнитные подшипники ротора на левой и правой сторонах; 7,8 – статор и обмотка магнитных подшипников; z_0, g_0 – номинальные зазоры между ротором и статором электродвигателя с магнитными подшипниками.

Из структуры и принципа работы, упомянутого выше, двигатель с поперечным полем можно рассматривать как два двигателя, которые имеют общий ротор.

В соответствии с выше перечисленным, математическая модель двигателя с поперечным полем была разработана во вращающейся системе координат dq :

$$\left. \begin{aligned}
 u_{sd1} &= R_s i_{sd1} + L_{sd1} \frac{di_{sd1}}{dt} - \omega_s L_{sq1} i_{sq1} \\
 u_{sq1} &= R_s i_{sq1} + L_{sq1} \frac{di_{sq1}}{dt} + \omega_s L_{sd1} i_{sd1} + \omega_s \psi_p \\
 u_{sd2} &= R_s i_{sd2} + L_{sd2} \frac{di_{sd2}}{dt} - \omega_s L_{sq2} i_{sq2} \\
 u_{sq2} &= R_s i_{sq2} + L_{sq2} \frac{di_{sq2}}{dt} + \omega_s L_{sd2} i_{sd2} + \omega_s \psi_p \\
 M_1 &= \frac{3}{2} Z_p \left[\psi_p i_{sq1} + i_{sd1} i_{sq1} (L_{sd1} - L_{sq1}) \right] \\
 M_2 &= \frac{3}{2} Z_p \left[\psi_p i_{sq2} + i_{sd2} i_{sq2} (L_{sd2} - L_{sq2}) \right] \\
 M_\Sigma &= M_1 + M_2 = M_m + \frac{J}{Z_p} \frac{d\omega}{dt} \\
 F_\Sigma &= k_1 (i_{2d} - i_{1d}) + k_1 (i_{2d} - i_{1d}) z - k_2 z \\
 k_1 &= 2 \frac{\mu_0 N^2}{g_0^2} \psi_p; k_2 = 2 \frac{\mu_0}{S_p g_0} \psi_p^2
 \end{aligned} \right\}$$

Индексы 1 и 2 предназначены для обозначения левой стороны двигателя (внешний статор) и правой стороны двигателя (внутренний статор), соответственно.

Эквивалентная математическая модель двигателя с поперечным полем исходя из (1) представлена на рисунке 2.

На рисунке 2 приняты обозначения:

$$k_1 = 2 \frac{\mu_0 N^2}{g_0^2} \psi_p; k_2 = 2 \frac{\mu_0}{S_p g_0} \psi_p^2; k_3 = \frac{N^2 \mu_0 \psi_p^2}{4 g_0^2}; k_4 = \frac{N^2 \mu_0 \psi_p^2}{2 g_0^2}.$$

Двигатель с поперечным полем в двух рабочих зонах.

Вектора напряжения, тока и магнитного потока двигателя с поперечным полем в двух рабочих зонах представлены на рисунке 3. Из (1) видно, что крутящий момент двигателя с поперечным полем состоит из двух частей: основная часть с умножением $\psi_p i_{sq}$, и реактивная часть с разностью статорной индуктивности ($L_{sd} - L_{sq} \neq 0$). Во всех рабочих зонах, двигатель должен производить вспомогательный крутящий момент для компенсации реактивной части.

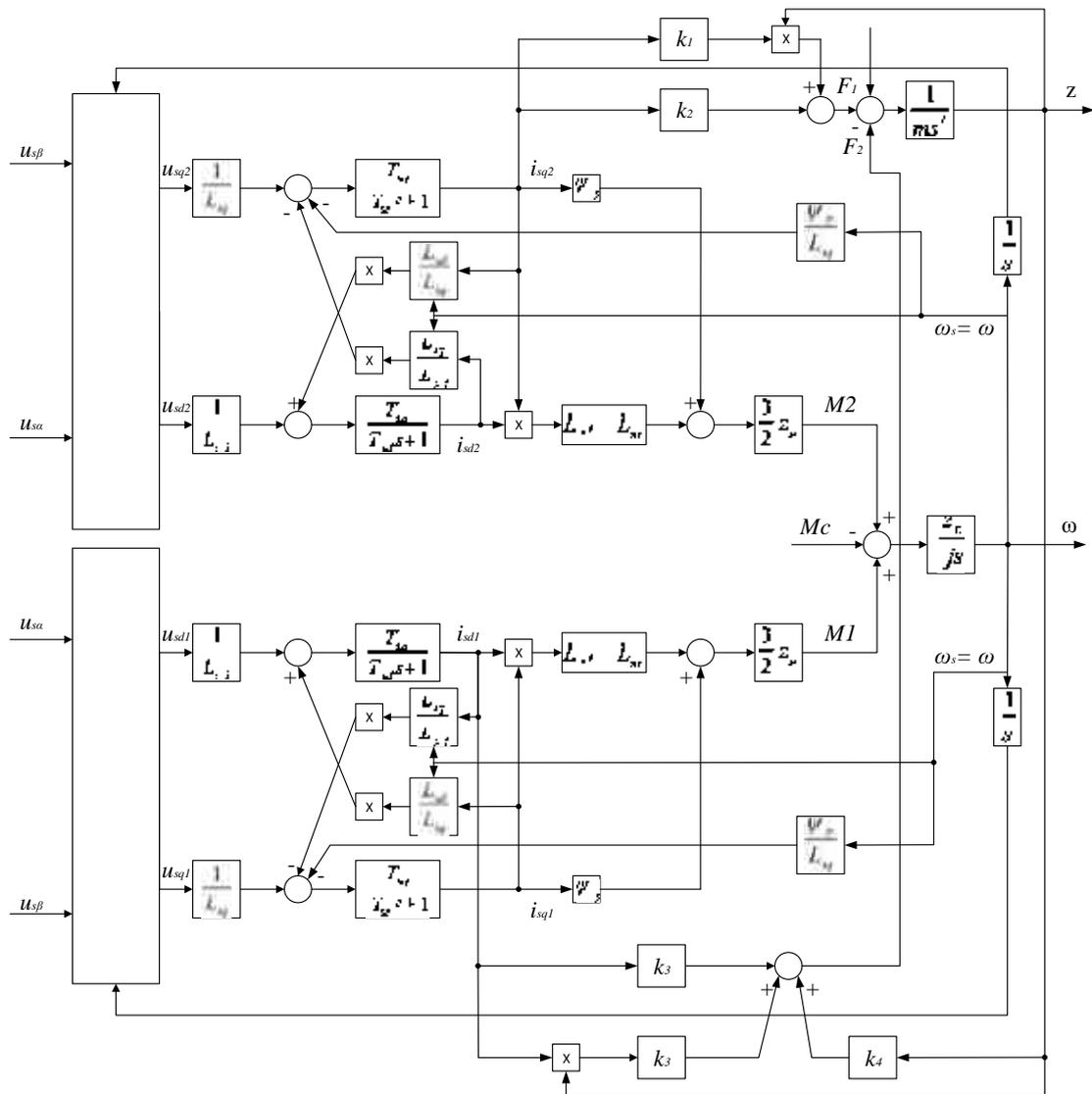
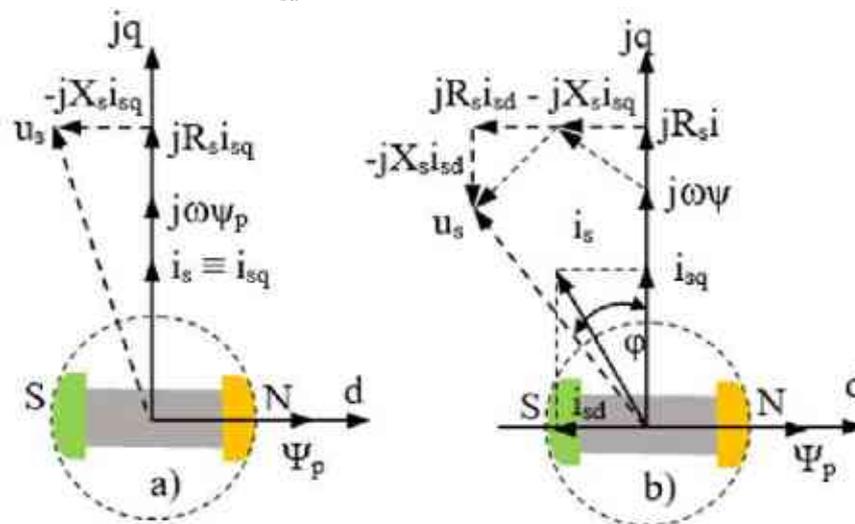


Рис. 2 – Эквивалентная математическая модель двигателя с поперечным полем

Существованием реактивной части обычно пренебрегает в классических решениях управления. Игнорирование этого компонента помогает упростить систему управления и может быть принято в действительности в пределах номинальной скорости вращения, так как в этом диапазоне $i_{sd} = 0$ рисунок 3а. Напротив, в диапазоне скоростей выше номинальной скорости, поток должен быть уменьшен путем подачи отрицательного тока i_{sd} . Двигатель находится в режиме потока ослабления, ток пропорционален скорости ротора рисунок 3б. Это приводит к тому, что реактивная составляющая крутящего момента становится более значительной, и это нельзя игнорировать.

Когда скорость двигателя становится выше номинальной скорости, частота так же начинает превышать значение номинальной частоты f_{1dm} но напряжение не может превышать номинальное напряжение U_{dm} . Максимальное значение напряжения $U_1 = U_{dm}$. Выражение электродвижущей силы двигателя показывает, что поток обратно пропорционален частоте, это эквивалентно со случаем, что поток двигателя постоянного тока уменьшается для ускорения.

В отличие от синхронного двигателя с постоянным магнитом, прикрепленным внутри ротора и реактивного синхронного двигателя, двигатель с поперечным полем работает в номинальной скорости, спектр поддерживает ток $i_{sd} = 0$.

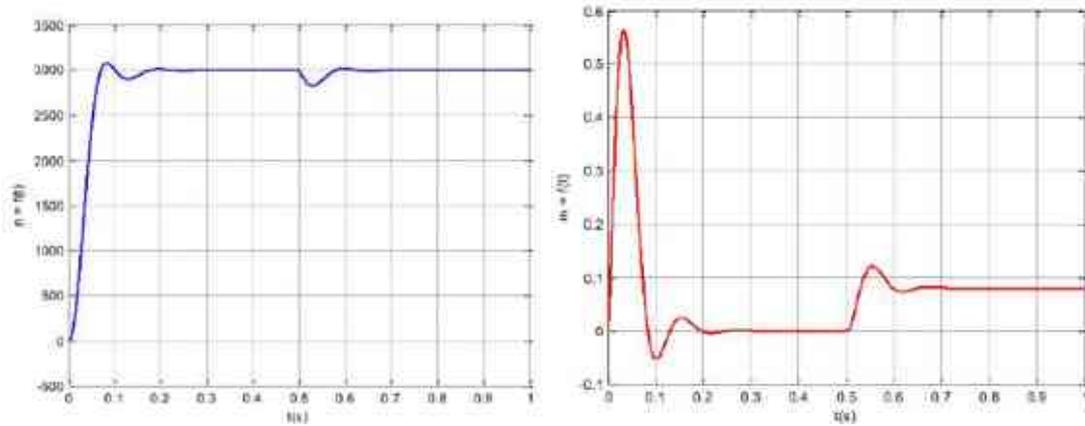


*Рис. 3 – Вектор состояния напряжения, тока и магнитного потока двигателя с поперечным полем в двух рабочих областях:
а) при номинальной скорости
б) выше номинальной скорости [1]*

Перечень ссылок

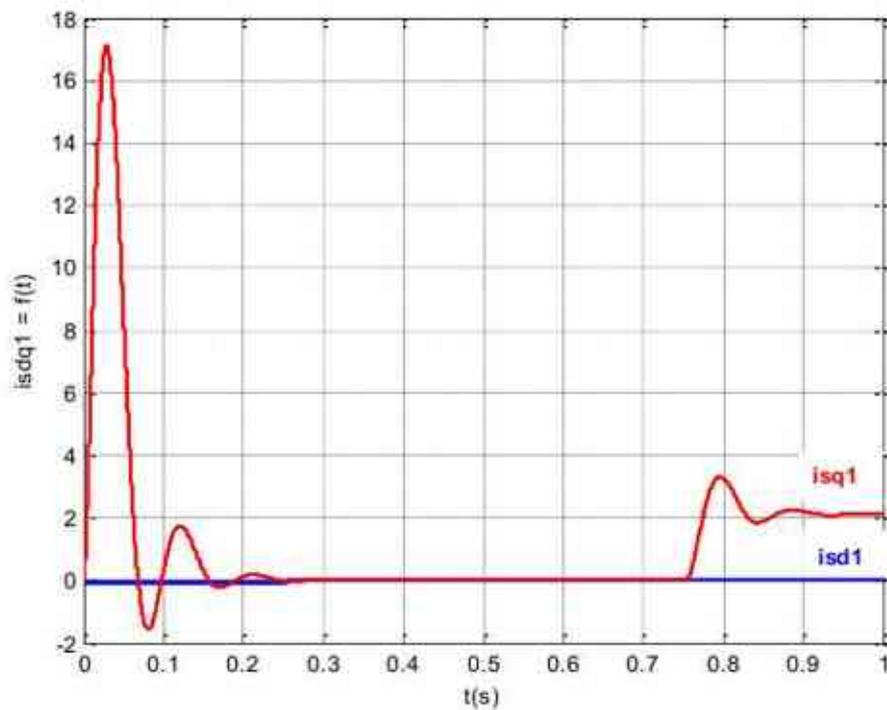
1. Xuan Minh Tran, Nhu Hien Nguyen, Quoc Tuan Duong «Special Issue on Recent Advances in Engineering Systems» (2017) Vol. 2, No. 3, 153-159.
2. Устройство и принцип работы двигателя на постоянных магнитах. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://slarkenergy.ru/oborudovanie/engine/-na-postoyannyx-magnitax.html>

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ,
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ**



а)

б)



в)

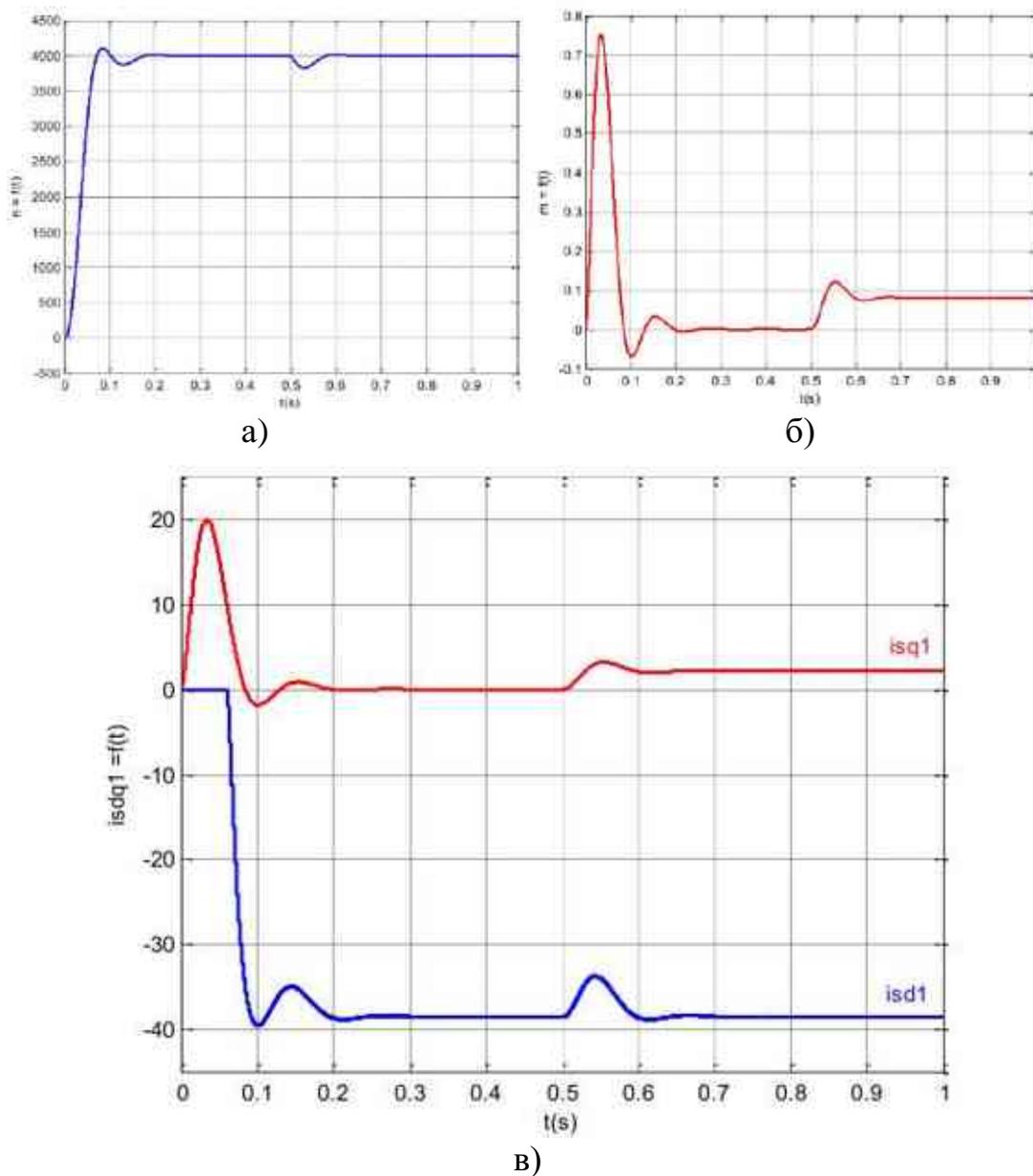
Рис. 4 – Результаты работы двигателя с номинальной скорости ($n=3000$, $m=0.08$ Нм,) [1]

а) график угловой скорости двигателя;

б) график момента двигателя;

в) графики токов в вращающейся системе координат dq .

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ,
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ**



в)
*Рис. 5 – Результаты работы двигателя выше номинальной скорости
($n=4000$, $m=0.08$ Нм) [1]
а) график угловой скорости двигателя;
б) график момента двигателя;
в) графики токов в вращающейся системе координат dq.*