

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

*Розроблено польову математичну модель і виконано моделювання режимів роботи тягового синхронного двигуна з постійними магнітами, призначеного для використання в електромобілях. Розроблена математична модель враховує обертання ротора в масштабі реального часу і дозволяє розрахувати та проаналізувати основні робочі характеристики двигуна як функції часу.*

*Разработана полевая математическая модель и выполнено моделирование режимов работы тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами, предназначенного для использования в электромобилях. Разработанная математическая модель учитывает вращение ротора в масштабе реального времени и позволяет рассчитать и проанализировать основные рабочие характеристики двигателя в виде временных функций.*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наметилась тенденция к широкому применению частотно-управляемых синхронных электродвигателей с постоянными магнитами (СДПМ) в качестве тяговых двигателей транспортных средств. Так, в материалах Шанхайской конференции 2011 года [3] приводятся результаты, которые убедительно доказывают преимущества использования СДПМ в электромобилях по сравнению с другими типами электродвигателей. Применение постоянных магнитов с высокой удельной энергией позволяет существенно улучшить массогабаритные, энергетические и стоимостные показатели тяговых двигателей.

Размещенный на электромобиле частотно-управляемый тяговый СДПМ питается от преобразователя, который в свою очередь получает напряжение от аккумуляторных батарей. Электропривод должен обеспечить заданные тяговые характеристики в широком диапазоне частот вращения ведущей оси электромобиля при относительно невысоких амплитудах напряжения электропитания. При этом СДПМ, очевидно, должен иметь минимальные массогабаритные характеристики при допустимых нагревах обмотки статора и постоянных магнитов. Необходимость получения высоких массоэнергетических показателей в тяговых СДПМ требует разработки новых подходов к их расчету и проектированию. Это связано не только с существенным различием характеристик тяговых СДПМ и СДПМ традиционного исполнения [2], но и с трудностями моделирования традиционными методами с достаточной точностью явления размагничивания постоянных магнитов в процессе работы двигателя.

Целью статьи является моделирование режимов работы тягового СДПМ на основе разработанной полевой математической модели, учитывающей вращения ротора во времени и обеспечивающей высокий уровень достоверности результатов моделирования.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ведущими мировыми производителями электромобилей предложены и используются различные конструкции тяговых СДПМ [3]. В данной статье рассматривается частотно-управляемый тяговый СДПМ для привода электромобиля, разрабатываемого на российском автомобилестроительном предприятии. СДПМ имеет следующие номинальные данные: мощ-

ность  $P_{2N} = 35$  кВт, фазное напряжение питания  $U_{1N} = 93,5$  В, число пар полюсов  $p = 4$ , частоты питания и вращения  $f_{1N} = 200$  Гц и  $n_{2N} = 3000$  об/мин, диапазон частоты вращения – (0...12000) об/мин.

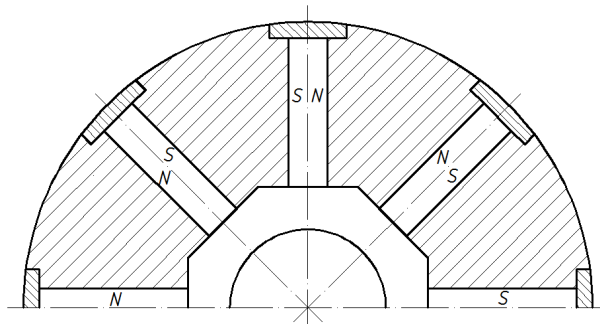


Рис 1. Конструкции ротора СДПМ

На статоре в пазах шихтованного магнитопровода уложена распределенная трехфазная обмотка.

Ротор СДПМ имеет "коллекторную" конструкцию (рис. 1), в которой магнитный поток формируется постоянными магнитами с тангенциальным направлением вектора намагниченности, расположенными по бокам ферромагнитных полюсов. Такая конструкция позволяет сконцентрировать больший магнитный поток в полюсе, чем при радиальном намагничивании магнитов, что важно в условиях ограниченных размеров активной зоны машины. Кроме того, конструкция ротора с радиальным намагничиванием магнитов имеет следующий недостаток. Известно, что магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом пропорционален объему магнита, однако, в роторах с радиальным намагничиванием магнитов при неизменной длине и ширине магнита увеличение его толщины больше некоторого значения не приводит к увеличению магнитного потока вследствие сопутствующего увеличения воздушного зазора и уменьшения индуктивного сопротивления  $x_d$ . Этого недостатка лишена "коллекторная" конструкция ротора, в которой изменение любого размера магнита приводит к соответствующему изменению магнитного потока.

Однако, недостатком "коллекторной" конструкции ротора можно считать специфический вид угловой

характеристики СДПМ – зависимости электромагнитного момента  $M_{ЭМ}$  от угла нагрузки  $\Theta$ . В отличие от явнополюсных синхронных машин с электромагнитным возбуждением и от СДПМ с радиально намагниченными магнитами, в СДПМ с "коллекторной" конструкцией ротора индуктивное сопротивление машины по поперечной оси больше индуктивного сопротивления по продольной оси  $x_d > x_q$ . Это обусловлено отсутствием ферромагнитного ядра ротора и, как следствие, замыканием продольного магнитного потока полюсов через магниты, имеющие магнитную проницаемость близкую к  $\mu_0$ . Вследствие этого реактивная составляющая  $M_2$  результирующего момента

$$M_{ЭМ} = M_1 + M_2 = \frac{m_1 \cdot E_f \cdot U_{1\phi}}{\Omega_1 \cdot x_d} \sin \Theta + \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \Omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\Theta,$$

при угле нагрузки  $0 < \Theta < 90^\circ$  имеет отрицательное значение (рис. 2).

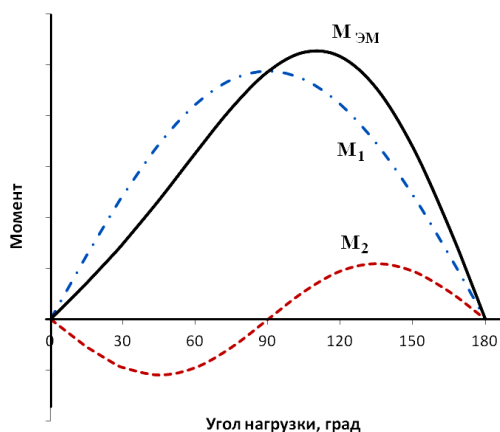


Рис 2. Типовая угловая характеристика СДПМ с "коллекторной" конструкцией ротора

Это сдвигает точку максимального момента в область  $\Theta > 90^\circ$ , что приводит к увеличению номинального угла нагрузки и может снижать устойчивость работы двигателя.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Моделируются характеристики СДПМ как временные функции на периоде  $T$ , равном времени поворота ротора на угол, соответствующий двум полюсным делениям двигателя. На временном интервале  $[0...T]$  решается следующее стационарное уравнение поля относительно векторного магнитного потенциала  $A$ :

$$\nabla \times \left( \frac{\nabla \times A - B_r}{\mu} \right) = J_c, \quad (1)$$

где  $B_r$  – остаточная индукция постоянного магнита;  $J_c$  – плотности токов в обмотке статора. Расчетной областью является поперечное сечение активной зоны СДПМ (поле рассматривается в двумерной постановке). Использование уравнения (1) обосновано тем, что электропроводность всех участков расчетной области равна нулю (отсутствуют вихревые токи). Функциями времени в уравнении (1) являются:

1) плотности токов фаз обмотки статора:

$$\begin{aligned} J_{cA} &= J_m \cos \omega_1 t, \\ J_{cB} &= J_m \cos (\omega_1 t + 2\pi/3), \\ J_{cC} &= J_m \cos (\omega_1 t + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2)$$

где  $J_m$  – амплитуда плотности тока, определяемая по известным значениям фазного тока статора и площади сечения проводников;

2) координаты точек ротора. Приращения декартовых координат ротора  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  на временном шаге  $\Delta t$  задаются следующими формулами:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \cos[\omega_2(t + \Delta t)] \cdot x - \sin[\omega_2(t + \Delta t)] \cdot y - x, \\ \Delta y &= \sin[\omega_2(t + \Delta t)] \cdot x + \cos[\omega_2(t + \Delta t)] \cdot y - y, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\omega_2$  – угловая частота вращения ротора.

Составляющие вектора магнитной индукции  $B_x$  и  $B_y$  и напряженности электрического поля  $E_z$  определяются по формулам

$$B_x = \partial A / \partial y, \quad B_y = -\partial A / \partial x, \quad E_z = -\partial A / \partial t. \quad (4)$$

Для расчета ЭДС в фазе обмотки статора используется следующее интегральное выражение:

$$E_f = \frac{2 \cdot N_p \cdot L_1}{S_p \cdot a_1} \int_{S_i} E_z \cdot ds, \quad (5)$$

где  $S_i$  – площадь интегрирования (суммарная площадь поперечного сечения проводников фазной зоны обмотки статора);  $N_p$  – число эффективных проводников в пазу;  $S_p$  – площадь паза;  $a_1$  – число параллельных ветвей обмотки статора;  $L_1$  – аксиальная длина сердечника статора.

Электромагнитный момент СДПМ рассчитывается через тензор магнитного натяжения:

$$M_{ЭМ} = \frac{2 \cdot p \cdot R_2 \cdot L_2}{\mu_0} \int_0^\tau B_n B_\tau dl, \quad (6)$$

где  $B_n$ ,  $B_\tau$  – нормальная и тангенциальная к поверхности ротора составляющие магнитной индукции;  $R_2$ ,  $L_2$  – радиус и длина ротора;  $p$  – число пар полюсов;  $\tau$  – полюсное деление ротора. Расчет поля, ЭДС и электромагнитного момента выполняется на каждом временном шаге  $\Delta t$ . Объединение полученных решений на интервале  $[0...T]$  дает искомые временные зависимости  $E_f(t)$  и  $M_{ЭМ}(t)$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью разработанной математической модели в программном пакете COMSOL было выполнено численное моделирование рассматриваемого СДПМ в режимах холостого хода и в режиме номинальной нагрузки.

*Режим холостого хода.* На рис. 3 показан фрагмент картины магнитного поля СДПМ в режиме холостого хода. При проектировании СДПМ использовался следующий критерий выбора параметров системы "воздушный зазор – постоянные магниты". На холостом ходу СДПМ (при отсутствии тока статора) и номинальной частоте вращения ротора магнитный поток постоянных магнитов должен индуцировать в фазах обмотки статора заданную номинальную электродвижущую силу  $E_0 = (1,05...1,08) U_{1\phi N}$ .

На рис. 4 изображена расчетная временная зависимость ЭДС в обмотке статора на холостом ходу.

Амплитуда первой гармоники ЭДС равна 139 В, что составляет  $E_0 = 1,05U_{1фN}$ .

Очевидно, что кроме основной гармоники в кривой ЭДС присутствуют и высшие гармоники, обусловленные зубчатостью поверхности статора. Спектральный состав кривой показан на рис. 5.

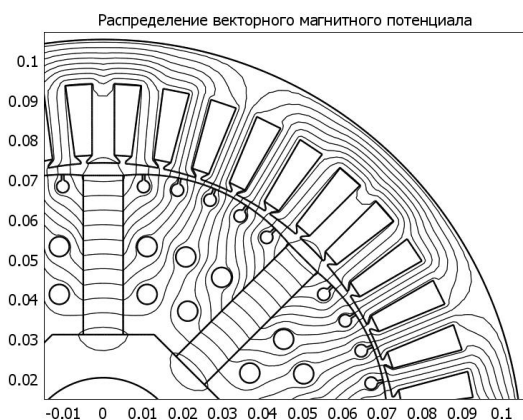


Рис. 3. Магнитное поле СДПМ в режиме холостого хода

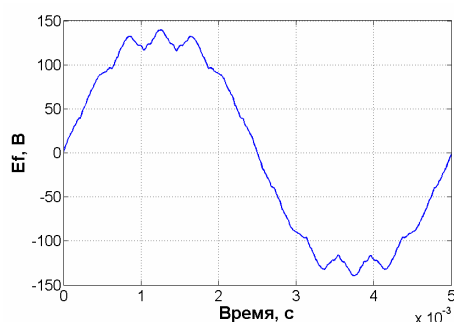


Рис. 4. ЭДС СДПМ на холостом ходу



Рис. 5. Высшие гармоники ЭДС СДПМ в режиме холостого хода

Среди высших гармоник наибольшей является третья (составляет 6,1 % от первой), которая при соединении трехфазной обмотки в звезду не вызывает токов третьей гармоники. Процентное соотношение других высших гармоник ЭДС не превышает 4,5%.

*Режим номинальной нагрузки.* Для анализа режима нагрузки выполняется серия расчетов при варьировании угла нагрузки  $\Theta$ . Фрагмент картины поля показан на рис. 6. Номинальный угол нагрузки равен углу между продольной осью полюса ротора и осью результирующего магнитного поля двигателя. Этот угол показан на рис. 6 и равен 23,5 электрических или

5,9 геометрических градусов.

Расчет номинального режима выполняется итерационным методом. Заданными величинами являются напряжение питания и электромагнитный момент, а искомыми – ток обмотки статора и угол нагрузки. Вначале задается первое приближение тока статора и серией расчетов при увеличении угла нагрузки добиваются требуемого значения момента, которое рассчитывается по формуле (6). Далее рассчитывается ЭДС в обмотке статора по формуле (5), падение напряжения в обмотке статора и результирующее фазное напряжение. После сравнения полученной величины напряжения питания с заданной, величина тока в обмотке статора корректируется и вновь серией расчетов определяется значение угла нагрузки, при котором СДПМ развивает необходимый момент. В результате достигается согласованная комбинация величин напряжения, тока, момента и угла нагрузки.

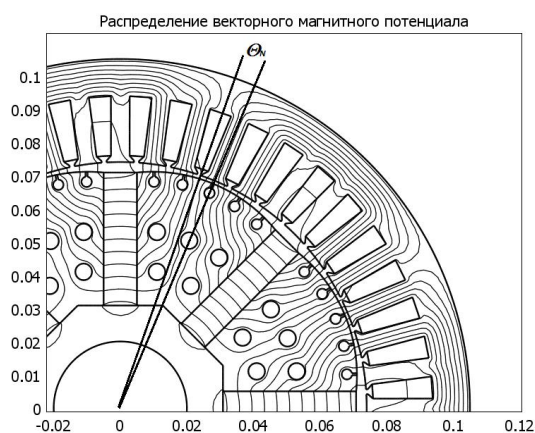


Рис. 6. Магнитное поле СДПМ в номинальном режиме

Коэффициент мощности определяется по фазовому смещению временных зависимостей заданного тока обмотки статора и расчетной ЭДС, индуцированной в обмотке статора результирующим магнитным потоком. На рис. 7 показаны временные зависимости заданного тока статора и расчетной ЭДС. Рассматриваемый СДПМ с целью получения наибольшего КПД спроектирован для работы с номинальным  $\cos\phi$ , близким к единице. Расчеты показали, что в номинальном режиме данного СДПМ фазовый угол смещения между током и ЭДС равен 10,8 эл. град., чему соответствует  $\cos\phi = 0,982$  (индуктивный).

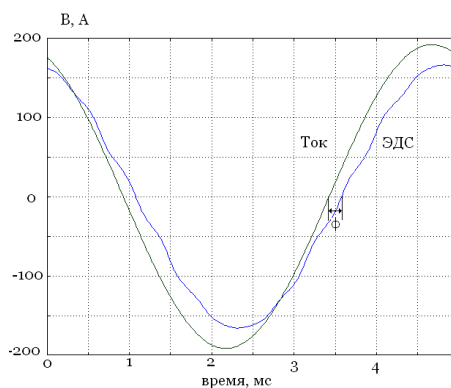


Рис. 7. К определению  $\cos\phi$  СДПМ

Одной из важных проблем в СДПМ с "коллекторной" конструкцией ротора являются пульсации электромагнитного момента. Причины этих пульсаций обусловлены явнополюсной конструкцией ротора и зубчатостью внутренней поверхности статора. Результатом пульсаций электромагнитного момента являются повышенный уровень шума и вибраций, износ подшипников, а также снижение надежности СДПМ.

На рис. 8 приведена временная зависимость электромагнитного момента. Среднее значение момента, равно 112 Нм. На кривой видны значительные пульсации момента.

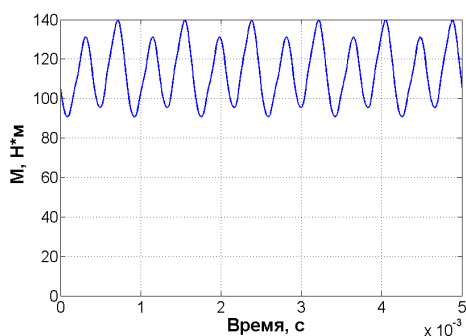


Рис. 8. Электромагнитный момент СДПМ с "коллекторной" конструкцией ротора

Среди методов снижения пульсаций момента необходимо отметить следующие:

- 1) увеличение воздушного зазора;
- 2) профилирование полюсов ротора [1];
- 3) скос пазов статора.

Проведенные исследования дали возможность проанализировать эффективность таких технических решений. Если в исходном варианте без применения специальных мер амплитуда пульсаций составила 21,7 % от среднего значения момента, то только при профилировании полюсов ротора (но без скоса пазов статора) они снижаются до 14 %, а при одновременном профилировании полюсов ротора и выполнении скоса пазов статора амплитуды пульсаций снижаются до 3,8 %.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная полевая метаматематическая модель тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами позволяет рассчитать рабочие характеристики и проанализировать режимы работы двигателя с учетом вращения его ротора в режиме реального времени. Это не только обеспечивает результатам моделирования высокий уровень достоверности, но и позволяет на стадии проектирования двигателя оптимизировать выбор его конструктивных параметров.

Применение разработанной модели особенно актуально для электрических машин с постоянными магнитами, расчет и проектирование которых традиционными методами осложняется необходимостью определения кривых возврата используемого магнита. При использовании полевого подхода кривые возврата учитываются автоматически, а в модель вносятся лишь данные о величине остаточной индукции и относительной магнитной проницаемости магнита.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенников В.В., Прымак М.В. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами // Электротехника и электроэнергетика. – 2009. – №2. – С. 57-60.
2. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 76-77.
3. SAE 2011 Powertrain Electric Motors Symposium – Shanghai, 18-21 November, 2011.

**Bibliography (transliterated):** 1. Grebennikov V.V., Pryjmak M.V. Issledovanie vliyaniya konfiguracii magnitnoj sistemy na momentnye harakteristiki `elektrodvigatelej s postoyannymi magnitami // `Elektrotehnika i `elektro`energetika. - 2009. - №2. - S. 57-60. 2. Ledovskij A.N. `Elektricheskie mashiny s vysokoko`ercitivnymi postoyannymi magnitami. - M.: `Energoatomizdat, 1985. - S. 76-77. 3. SAE 2011 Powertrain Electric Motors Symposium - Shanghai, 18-21 November, 2011.

Поступила 09.04.2013

*Васьковский Юрий Николаевич, д.т.н. проф.  
Гайденко Юрий Антонович, к.т.н., доц.*  
Национальный технический университет Украины  
"Киевский политехнический институт"  
кафедра электромеханики  
03056, Киев, пр. Победы, 37, к. 20  
тел. (044) 4068238, e-mail: vun157@voliacable.com

*Русятинский Александр Евгеньевич*  
ПАО "НПП "Смелянський електромеханічний завод"  
20705, Черкасская обл., Смела, ул. Ю. Коробейника, 1г

*Vas`kovsky Y.N., Gaydenko Y.A., Rusyatinskiy A.Y.*  
**Modeling of traction synchronous permanent magnet motor modes.**

A mathematical model of electromagnetic field for simulating operational modes of traction synchronous motors with permanent magnets intended for electric vehicles is developed. The mathematical model takes into account real-time rotor rotation and allows calculating and analyzing the motor basic running characteristics as time functions.

**Key words – traction synchronous permanent magnet motor, mathematical model of electromagnetic field, basic running characteristics.**