

УДК 621.313.17

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Ю.Н.Васьковский¹, докт.техн.наук, Ю.А.Гайденко², канд.техн.наук, А.Е.Русятинский³

¹ – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: vun157@voliacable.com

² – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,

³ – ПАО "НПП "Смелянский электромеханический завод",

ул. Ю.Коробейника, 1, Смела, Черкасская обл., 20705, Украина.

Создание эффективных синхронных двигателей с постоянными магнитами для электромобилей требует разработки полевых математических моделей, позволяющих моделировать происходящие процессы во времени с учетом вращения ротора. Рассмотрен двигатель с "коллекторной" конструкцией ротора. С помощью разработанной полевой модели выполнен комплекс исследований, позволивший обосновать выбор основных конструктивных параметров двигателя, обеспечивающих заданные энергетические и габаритные показатели: число полюсов, величину воздушного зазора, размеры постоянных магнитов. Исследован гармонический состав ЭДС обмотки статора и пульсации электромагнитного момента. Показано, что совместное применение профилирования полюсов ротора и скоса пазов статора существенно уменьшают пульсации момента. Библиограф. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами для электромобиля, полевая математическая модель, выбор конструктивных параметров.

Введение. Техничко-экономическая эффективность, конкурентоспособность и перспективы широкого внедрения электромобилей определяются техническими показателями тягового электропривода, состоящего из энергоемкого источника электропитания, системы управления и тягового электродвигателя. Тяговый электродвигатель обеспечивает не только управление моментами ведущей оси электромобиля, но и должен обладать высокими массоэнергетическими показателями. Выполненный ведущими мировыми производителями электромобилей сравнительный анализ характеристик тяговых электродвигателей различного типа показал [6], что наиболее перспективным для электромобилей является синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ).

Предъявляемые к приводу электромобиля жесткие технико-экономические требования обуславливают ряд важных особенностей тяговых СДПМ, существенно отличающих их от традиционных СДПМ [5]. Тяговый частотно-регулируемый СДПМ должен обеспечить электромобилю заданные тяговые характеристики в широком диапазоне частот вращения ротора при высоком КПД, получать электропитание от источника при относительно невысоких амплитудах напряжений, быть способным в условиях городского цикла движения непрерывно работать в динамических режимах ускорения и торможения, обладать минимальными габаритами при допустимых нагревах обмотки статора и постоянных магнитов и др. Поэтому создание эффективных и надежных тяговых СДПМ для электромобилей представляет сложную научно-техническую задачу, требующую разработки новых подходов к проектированию СДПМ на основе математических моделей с высоким уровнем достоверности. Такими моделями являются полевые математические модели, позволяющие моделировать физические процессы в СДПМ во времени с учетом вращения ротора.

Целью статьи является обоснование выбора основных параметров тягового СДПМ для электромобиля при его проектировании с использованием полевых математических моделей.

Постановка задачи проектирования СДПМ. В технических требованиях на тяговый СДПМ задаются исходные номинальные данные: частота вращения ротора n_{2N} , мощность P_{2N} , фазное напряжение питания U_{IN} , а также требуемые массогабаритные показатели, диапазоны регулирования частоты вращения ротора и мощности двигателя. Следует подчеркнуть, что выбор "номинального" режима частотно-регулируемого СДПМ является достаточно условным и определяется диапазонами регулирования частоты вращения и мощности, требуемыми тяговыми характеристиками и другими факторами.

Далее рассматривается частотно-регулируемый СДПМ для электромобиля, разрабатываемого на российском автомобилестроительном предприятии. СДПМ имеет следующие данные: $n_{2N} = 3000$ об/мин, $P_{2N} = 35$ кВт, $U_{IN} = 93,5$ В (задается исходя из параметров источника питания и требований техники безопасности), внешний диаметр сердечника статора – 210 мм, масса двигателя не более 40 кг, диапазон частоты вращения – (0 ... 12000) об/мин. На основе анализа исходных данных принята следующая конструкция основных узлов СДПМ. На статоре в пазах шихтованного магнитопровода уложена распределенная трехфазная обмотка. Конструкция ротора – “коллекторного” типа [5], в

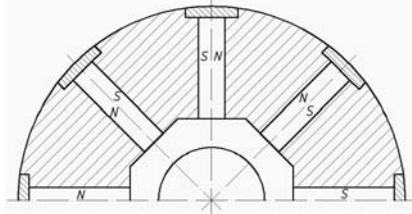


Рис. 1

которой магнитный поток полюсов формируется радиально установленными постоянными магнитами с тангенциальным направлением вектора намагниченности (рис. 1). При проектировании СДПМ необходимо выбрать: а) число полюсов и номинальную частоту питающего напряжения; б) величину воздушного зазора; в) материал и размеры постоянных магнитов; г) обосновать технические решения по снижению пульсаций электромагнитного момента. Решение этих задач с использованием полевых моделей основано на проведении численных экспериментов при вариациях конструктивных параметров. Сравнительный анализ вариантов позволяет

выявить оптимальную комбинацию параметров, обеспечивающую требуемые характеристики СДПМ.

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 $[0 \dots T]$ решается следующее стационарное уравнение поля относительно векторного магнитного потенциала A :

$$\Delta \times [(\Delta \times A - B_r) \mu^{-1}] = J_c, \quad (1)$$

где B_r – остаточная индукция постоянного магнита; J_c – плотность токов в обмотке статора. Расчетной областью является поперечное сечение активной зоны СДПМ (поле рассматривается в двумерной постановке). Использование уравнения (1) возможно, поскольку электропроводность всех участков расчетной области принимается равной нулю – в расчетной области отсутствуют вихревые токи. Функциями времени в уравнении (1) являются: 1) плотности токов фаз обмотки статора

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

где J_m – амплитуда, определяемая по значениям фазного тока статора и площади сечения проводников, $\omega_1 = 2\pi f_1$ – угловая частота тока во времени; 2) координаты x, y точек ротора. Приращения $\Delta x, \Delta y$ декартовых координат ротора на временном шаге Δt задаются по следующим формулам:

$$\Delta x = \cos[\omega_2(t + \Delta t)]x - \sin[\omega_2(t + \Delta t)]y - x, \quad \Delta y = \sin[\omega_2(t + \Delta t)]x + \cos[\omega_2(t + \Delta t)]y - y, \quad (3)$$

где ω_2 – угловая частота вращения ротора. Составляющие вектора магнитной индукции B_x и B_y и напряженности электрического поля E_z определяются по соотношениям

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

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

$$E_f = 2N_p L_1 (S_p a_1)^{-1} \int_{S_i} E_z ds, \quad (5)$$

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

$$M_{EM} = 2p R_2 L_2 \mu_0^{-1} \int_0^\tau B_n B_\tau dl, \quad (6)$$

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

Далее приведены результаты выбора основных конструктивных параметров СДПМ, полученные с использованием разработанной полевой математической модели.

Выбор числа полюсов и номинальной частоты питающего напряжения. Одной из главных задач проектирования частотно-регулируемого СДПМ для электромобиля является выбор числа его полюсов и соответствующей номинальной частоты питающего напряжения. Основными факторами, влияющими на выбор числа полюсов СДПМ, являются: максимальная частота вращения ротора, требуемые габаритные размеры, заданные законы частотного управления, потери в магнитопроводе, сложность и технологичность конструкции. Выбор “номинального” режима зависит от требуемых тяговых характеристик и соответствующих законов управления двигателем. Так, при использовании в диапазоне регулирования двух законов управления – “при постоянном моменте” и “при постоянной мощности” – “номинальную” точку, как правило, выбирают вблизи границы перехода от одного закона к другому. Заданная номинальная частота вращения $n_2 = 3000$ об/мин может быть получена при $p = 1$ и частоте питания 50 Гц, что позволяет использовать классические методы проектирования электрических машин со всем комплексом рекомендаций, эмпирических зависимостей и т.п. Однако, как показал расчетный анализ, при $p \leq 2$ не удастся обеспечить требуемые габаритные размеры СДПМ. Уменьшение размеров активной зоны можно достичь за счёт увеличения числа пар полюсов и соответствующего увеличения частоты питания. В СДПМ с ротором “коллекторного” типа для лучшей концентрации магнитного потока в воздушном зазоре необходимо выбирать число пар полюсов не менее 3. Кроме того, с увеличением числа пар полюсов уменьшается вылет лобовых частей обмотки статора, что снижает суммарную длину двигателя и др. С другой стороны, при $p \geq 5$ и соответствующем увеличении частоты напряжения уменьшается КПД и увеличивается нагрев двигателя за счет увеличения потерь в магнитопроводе, усложняется конструкция из-за увеличения количества зубцов статора, снижается технологичность. Подробный анализ показал, что для рассматриваемого СДПМ оптимальным является его вариант при $p = 4$. При этом номинальная частота питающего напряжения равна 200 Гц, а максимальная частота при скорости 12000 об/мин составляет 800 Гц.

Выбор величины воздушного зазора. В синхронных машинах влияние магнитного потока обмотки якоря на магнитный поток возбуждения уменьшается с ростом величины воздушного зазора. Особенно это важно для СДПМ, в которых поток возбуждения создается магнитами, а поток реакции якоря при перегрузке двигателя может их размагничивать. Увеличение зазора снижает синхронные индуктивные сопротивления двигателя x_d, x_q , увеличивает его перегрузочную способность, ведет к уменьшению пульсационных и поверхностных потерь от зубцовых гармоник и улучшению виброакустических показателей в связи с уменьшением пульсаций электромагнитного момента. Однако увеличение воздушного зазора требует увеличения объема постоянных магнитов, что противоречит требованию минимальных габаритных размеров, усложняет конструкцию ротора и увеличивает стоимость СДПМ. Таким образом, выбор величины зазора взаимосвязан с выбором параметров постоянных магнитов. При проектировании СДПМ необходим совместный выбор зазора и магнитов методом последовательных приближений.

Принят 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 обмотке статора заданную номинальную электродвижущую силу $E_0 = (1,05 \dots 1,08) U_{IN}$. Алгоритм проектирования следующий.

1. Для заданных габаритов по стандартным методикам [2] рассчитывается статор СДПМ (расчет магнитопровода, обмотки и др.).

2. По рекомендациям для традиционных синхронных машин выбирается предварительное значение воздушного зазора δ с учетом необходимой перегрузочной способности СДПМ.

3. Для полученных размеров ротора (диаметр, длина) выбирается материал и размеры магнитов. С помощью полевой математической модели рассчитывается магнитное поле СДПМ в режиме холостого хода и по выражению (5) определяется ЭДС холостого хода E_0 .

4. При выполнении условия $E_0 = (1,05 \dots 1,08) U_{IN}$ расчет заканчивается, в противном случае уточняются параметры зазора и постоянных магнитов и вновь выполняется п.3 алгоритма.

Для рассматриваемого СДПМ выбран зазор $\delta = 1$ мм. Заданное действующее значение фазного напряжения питания равно $U_{IN} = 93,5$ В, а амплитудное – соответственно $U_{INm} = 132$ В. На рис. 2, а показана расчетная временная зависимость ЭДС холостого хода для СДПМ с оптимизированными размерами зазора и магнитов. На рис. 2, б даны результаты ее спектрального анализа.

Амплитуда первой гармоники ЭДС равна 139 В, что составляет $E_0 = 1,053 U_{1N}$. Среди высших гармоник наибольшей является третья (7,2% от первой), которая при соединении трехфазной обмотки в звезду не вызывает соответствующих токов третьей гармоники. Процентное соотношение других высших гармоник ЭДС не превышает 4,5%.

3) Выбор материала и размеров магнитов. Создание достаточно мощных СДПМ с высокими массоэнергетическими показателями возможно на основе высококоэрцитивных магнитов типа NdFeB или SmCo. Магниты на основе сплавов NdFeB имеют высокие значения остаточной индукции B_r (до 1,32 Тл) и коэрцитивной силы H_c (до 930 кА/м), а также характеризуются относительно небольшой стоимостью. Однако для обеспечения коррозионной устойчивости эти сплавы покрываются никелем

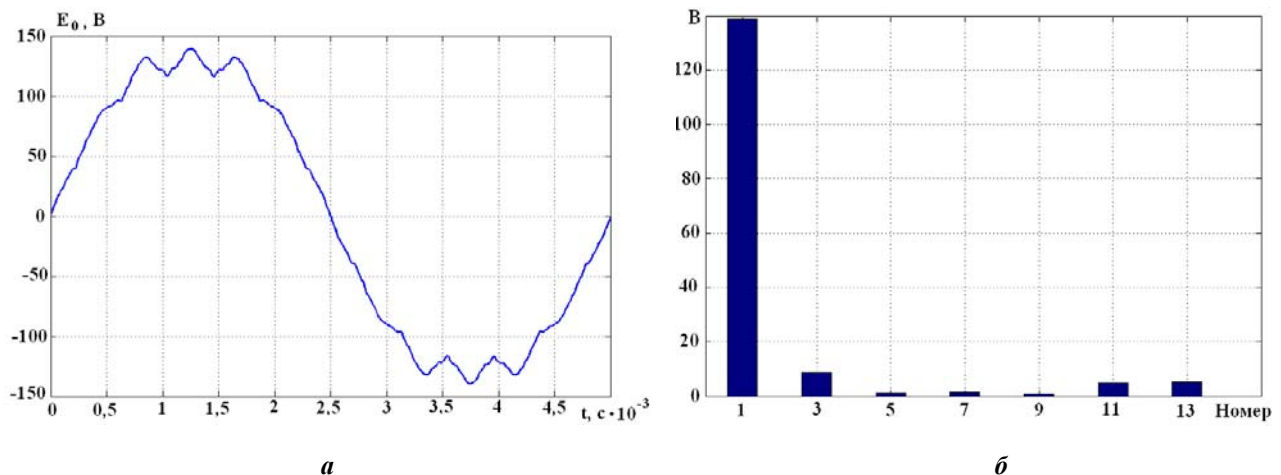


Рис. 2

или цинком. Их максимальная рабочая температура не превышает 175°C. Магниты на основе сплавов SmCo также имеют высокие показатели: остаточная индукция до 1,10 Тл, коэрцитивная сила до 775 кА/м, максимальная температура до 350°C, отличная коррозионная устойчивость, что обуславливает их большую стоимость. С учетом всего комплекса рабочих факторов для рассматриваемого СДПМ выбраны магниты NdFeB марки N33U с данными $B_r = 1,13$ Тл, $H_c = 852$ кА/м, $T_{max} = 175^\circ\text{C}$.

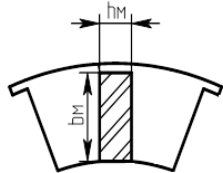


Рис. 3

В СДПМ с “коллекторной” конструкцией ротора используют магниты призматической формы с тангенциальным намагничиванием (рис. 3). Длина магнита l_M определяется выбранной длиной ротора двигателя. Выбор высоты магнита b_M ограничен, с одной стороны, заданным внешним диаметром ротора, и, с другой стороны, допустимыми по механической прочности размерами вала и немагнитной втулки. Таким образом, задание необходимого объема магнита осуществляется, в основном, за счет выбора его толщины h_M и, в незначительной степени, за счет выбора его высоты b_M .

Как уже отмечалось, одним из критериев выбора размеров h_M и b_M является создание магнитами потока возбуждения, достаточного для генерирования в обмотке статора на холостом ходу номинальной ЭДС. Другим условием выбора магнитов является обеспечение номинального режима двигателя (при номинальном токе статора $I_{1\phi} = 135$ А и номинальном моменте $M_{EM} = 112$ Нм). Серией расчетов при варьировании угла нагрузки двигателя достигается согласованная комбинация всех величин. Фрагмент картины магнитного поля в номинальном режиме показан на рис. 4. Номинальный угол нагрузки равен рассчитанному в электрических градусах углу между продольной осью полюса ротора и осью результирующего магнитного поля двигателя. Этот угол показан на рис. 4 и равен $\theta_N = 23,5^\circ$ электрических градусов или $5,9^\circ$ геометрических градусов. Коэффициент мощности определялся по фазовому смещению временных зависимостей заданного тока обмотки статора и расчетной ЭДС, индуцированной в обмотке статора результирующим магнитным потоком СДПМ. Фазовый угол смещения этих величин равен $10,8^\circ$ эл. град., чему соответствует $\cos \varphi = 0,982$ (индуктивный).

4) Конструктивные меры по снижению пульсаций электромагнитного момента. Для СДПМ с “коллекторной” конструкцией ротора характерны пульсации электромагнитного момента, обусловлен-

ные зубчатостью статора и наличием явно выраженных полюсов ротора. Пульсации момента могут достигать 25...30% от среднего значения, что требует принятия специальных технических решений по их снижению. Пульсации момента уменьшаются при увеличении воздушного зазора. При условии, что величина зазора уже выбрана по другим критериям, дополнительными мерами по снижению пульсаций момента являются профилирование полюсов ротора или выполнение скоса пазов статора.

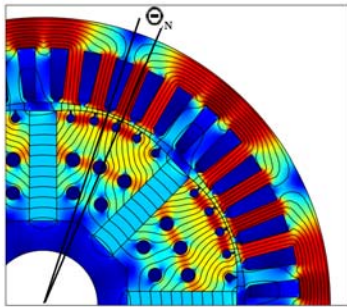


Рис. 4

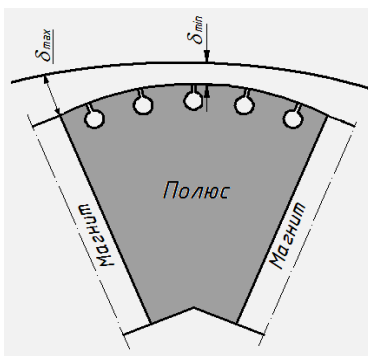


Рис. 5

В работе [3] показана эффективность профилирования полюсов в СДПМ с “коллекторной” конструкцией ротора. Профилирование полюсов состоит в выборе кривизны дуги внешней поверхности полюсов таким образом, чтобы был сформирован неравномерный воздушный зазор между полюсом и расточкой статора: по центру полюса зазор выбирается минимальным δ_{\min} , а по краям – максимальный δ_{\max} (рис. 5). Это техническое решение применяется в явнополюсных синхронных машинах для улучшения формы поля в зазоре. В результате серии расчетов было найдено оптимальное соотношение $\delta_{\max} / \delta_{\min}$. При номинальной нагрузке для каждого момента времени в процессе поворота ротора на два полюсных деления рассчитывалось магнитное поле СДПМ и по выражению (6) определялся электромагнитный момент, в результате чего находилась временная зависимость $M_{EM}(t)$. Затем выполнялся ее гармонический анализ. Временные зависимости момента кроме постоянной составляющей содержат чётные гармоники, наиболее существенной из которых является 12-я гармоника. В таблице приведены амплитуды высших (паразитных) гармоник момента (в Н·м) при различных δ_{\max} и заданном $\delta_{\min} = 1$ мм.

Видно существенное снижение паразитных гармоник уже при $\delta_{\max} = 3$ мм. Вместе с тем профилирование полюсов приводит к снижению ЭДС холостого хода и уменьшению толщины немагнитной втулки $h_{\text{втулки}}$, к которой крепятся полюсы и магниты. Это обусловлено тем, что при увеличении δ_{\max} магниты опускаются всё ниже и тем самым уменьшают толщину втулки. Поскольку толщина втулки обуславливает механическую прочность

ротора, то выбор слишком большого зазора по краям нецелесообразен. Для рассматриваемого СДПМ оптимальным является значение $\delta_{\max} = 3$ мм.

Другой эффективный способ уменьшения пульсаций – выполнение скоса пазов статора (или ротора [4]) на одно зубцовое деление статора.

№ гармоники момента	δ_{\max} , мм				
	1,0	3,0	4,0	5,0	6,0
6	5,50	3,92	3,54	3,66	3,97
12	20,22	13,05	12,92	12	11,08
18	1,20	0,69	0,61	0,57	0,55
24	2,02	1,19	1,33	1,31	1,32
E_0 , В	146,6	139	134,6	130,5	126,9
$h_{\text{втулки}}$, мм	11	11	10	9	8

ротора [4]) на одно зубцовое деление статора. В двумерной полевой модели результирующий электромагнитный момент в каждый момент времени определялся как среднее арифметическое пяти значений моментов, полученных при повороте ротора на 1/5 часть зубцового деления статора.

На рис. 6 показаны временные зависимости электромагнитного момента для трёх вариантов конструкции: 1) без профилирования и без скоса пазов статора; 2) с профилированием полюсов ротора, но без скоса пазов статора; 3) с профилированием полюсов ротора и со скосом пазов статора. Наглядно видно снижение пульсаций момента: амплитуды пульсаций в рассмотренных вариантах составляют соответственно 21,7%, 14% и 3,8% от среднего значения, равного 112 Нм.

Заключение. Разработана методика выбора основных параметров тяговых СДПМ с применением полевых математических моделей, строго учитывающих вращение ротора и позволяющих рассчитать характеристики двигателя как функции реального времени. Это

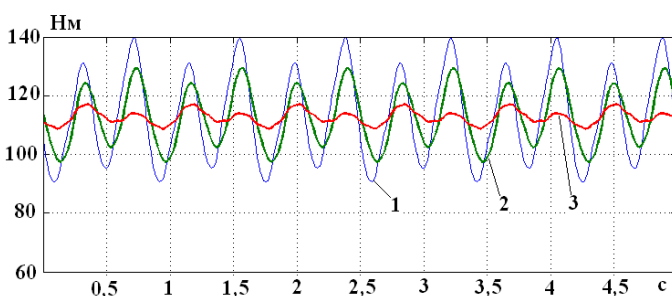


Рис. 6

позволило не только спроектировать СДПМ, но и разработать специальные технические решения по улучшению его показателей.

1. Антонов А.Е., Киреев В.Г. О двух типах систем возбуждения беспазовых магнито-электрических двигателей // Технічна електродинаміка. – 2010. – №6. – С. 30–35.
2. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко М.С. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов / Под ред. О.Д.Гольдберга. 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2001. – 430 с.
3. Гребеников 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.
4. Гребеников В.В., Прымак М.В., Шарaban Ю.В. Модификация магнитной системы электродвигателя ДВ-3000 с постоянными магнитами // Технічна електродинаміка. – 2011. – №2. – С. 30–35.
5. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 76–77.
6. SAE 2011 Powertrain Electric Motors Symposium. – Shanghai, 18-21 November, 2011.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ВИБІР КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Ю.М.Васьковський¹, докт.техн.наук, Ю.А.Гайденко², канд.техн.наук, О.С.Русятинський³

¹ – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, e-mail: yun157@voliacable.com

² – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

³ – ПАТ "НВП "Смілянський електромеханічний завод", вул. Ю.Коробейника, 1, Сміла, Черкаська обл., 20705, Україна.

Створення ефективних синхронних двигунів з постійними магнітами для електромобілів вимагає розробки польових математичних моделей, які дозволяють моделювати процеси, що відбуваються у часі, з урахуванням обертання ротора. Розглянуто двигун з "колекторною" конструкцією ротора. За допомогою розробленої польової моделі виконано комплекс досліджень, що дозволив обґрунтувати вибір основних конструктивних параметрів двигуна, які забезпечують задані енергетичні і габаритні показники: число полюсів, величину повітряного проміжку, розміри постійних магнітів. Досліджено гармонічний склад ЕРС обмотки статора і пульсації електромагнітного моменту. Показано, що спільне застосування профілювання полюсів ротора і скошу пазів статора істотно зменшують пульсації моменту. Бібл. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: синхронний двигун з постійними магнітами для електромобіля, польова математична модель, вибір конструктивних параметрів.

MATHEMATICAL MODELING AND SELECTING OF CONSTRUCTION PARAMETERS FOR TRACTION SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS

Yu.M.Vaskovskyi¹, Yu.A.Haidenko², A.E.Rusiatynskyi³

¹ – Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

e-mail: yun157@voliacable.com

² – National Technical University of Ukraine "KPI", Peremohy pr., 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

³ – Smelyansky Electromechanical Plant,

Yu.Korobeinika str., 1, Smela, Cherkaskyi reg., 20705, Ukraine.

Creating effective synchronous motors with permanent magnets for electric vehicles requires the development of the mathematical models of electromagnetic field to simulate the processes taking into account the rotation of the rotor in real time. Considered a "collector" type of rotor design. Executed the complex of scientific researches which allowed to substantiate the selection of the basic motor parameters, which to provide appropriate power and size, such as: the number of poles, the value of the air gap, the size of the permanent magnets. Investigated the harmonic composition of the EMF of the stator winding and the electromagnetic torque ripple. It is shown that the combined use of a special form of the poles of the rotor and the stator skewed slots significantly reduces the torque ripple. References 6, table 1, figures 6.

Keywords: synchronous motor with permanent magnets for electric vehicle, mathematical model of electromagnetic field, the choice of design parameters.

1. Antonov A.E., Kireev V.G. On two types excitation systems of non slot magneto-electric motor // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – № 6. – Pp. 30–35. (Rus)
2. Goldberg O.D., Gurin Ja.S., Sviridenko M.S. Design of electrical machines: Manual. for technical colleges, 2 ed. – Moskva:Vysshiaia shkola, 2001. – 430 p. (Rus)
3. Grebenikov V.V., Pryimak M.V. Investigation of the influence of the magnetic configuration of the system to the torque characteristics of electric motors with permanent magnets // Elektrotekhnik i elektroenergetika. – 2009. – №2. – Pp. 57–60. (Rus)
4. Grebenikov V.V., Pryimak M.V., Sharaban Yu.V. Modification of magnetic system of the electric motors DV-300 with permanent magnets // Tekhnichna elektrodynamika. – 2011. – №2. – Pp. 30–35. (Rus)
5. Ledovskii A.N. Electrical machines with high coactivity permanent magnets. – Moskva: Energoatomizdat, 1985. – Pp. 76–77. (Rus)
6. SAE 2011 Powertrain Electric Motors Symposium. – Shanghai, 18–21 November, 2011.

Надійшла 05.02.2013

Received 05.02.2013