

УДК 621.313.17

МОДИФИКАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДВ-3000 С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В.В.Гребеников¹, канд.техн.наук, **М.В.Приймак²**, **Ю.В.Шарабан³**

^{1,2} – Институт электродинамики НАН Украины,
пр.Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

³ – Государственное предприятие Харьковское агрегатное конструкторское бюро
ул. Сумская, 132, Харьков, 61023 Украина

В работе проведено численное исследование двух типов магнитных систем электрических двигателей. Предложен способ повышения магнитной индукции в зазоре электродвигателя ДВ-3000 путем формирования комбинированной магнитной системы ротора на основе плоских постоянных магнитов с тангенциальным намагничиванием и ферромагнитных концентраторов магнитных потоков. Проведено исследование влияния толщины постоянных магнитов на статические моментные характеристики двух типов электродвигателей при идентичных габаритных размерах статора: с радиальным и тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов в роторе. На основе численных исследований показано, что в электродвигателе с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов можно в 1,7 раза увеличить электромагнитный момент по сравнению с электродвигателем с радиальным намагничиванием постоянных магнитов. Библ. 2, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: электродвигатель, постоянный магнит, магнитная система, ферромагнитный концентратор.

Весь комплекс сложного и разнообразного электротехнического оборудования летательных аппаратов работает в условиях, значительно отличающихся от условий, в которых действует наземное оборудование. Современные летательные аппараты совершают полеты независимо от погодных условий на больших высотах. Как известно, с увеличением высоты температура воздуха уменьшается. У поверхности земли она может быть от минус 60°C зимой и до плюс 50°C летом (до 120°C вблизи авиадвигателя на самолете). Начиная с высоты 11 км и примерно до 35 км температура остается постоянной, равной минус 56,5°C и зимой, и летом.

Агрегаты авиационной техники должны иметь минимальные габариты и массу, работать в большом диапазоне температур окружающей среды и при этом выполнять необходимые функции на борту летательного аппарата. Приводом для гидравлических насосных станций является вентильный двигатель ДВ-3000 с постоянными магнитами на роторе. Электродвигатель ДВ-3000 с ротором традиционной конструкции (с магнитами, намагниченными в радиальном направлении) прошел весь цикл стендовых наземных и летных испытаний и в настоящее время эксплуатируется в составе гидравлической насосной станции на борту самолетов Ан-140, Ан-148 и Ан-158. Назначение насосной станции на борту самолета – обеспечение давления в гидросистеме для выполнения необходимых функций (выпуск-уборка стоек шасси, открытие-закрытие грузолуков, торможение колес при посадке, управление агрегатами механизации крыла и т.д.).

При отрицательных температурах окружающей среды, особенно при минус 60°C, резко увеличивается вязкость рабочей жидкости в гидросистеме самолета. Из-за этого при запуске насосной станции давление в гидросистеме, а следовательно, и момент на валу насоса растет быстрее, чем при положительных температурах, и двигатель должен гарантированно вывести насосную станцию на номинальный режим. Поэтому для увеличения надежности работы насосной станции на борту самолета целесообразно рассмотреть варианты модификации магнитной системы ротора электродвигателя ДВ-3000 с целью увеличения электромагнитного момента.

Электродвигатель ДВ-3000 представляет собой моноблок, состоящий из электромеханической части и электронного блока управления – коммутатора. Масса электромеханической части составляет 3,6 кг; масса статора в корпусе – 2,17 кг, масса ротора с валом – 1,15 кг. При номинальной

мощности 3 кВт удельная мощность электродвигателя составляет 0,83 кВт/кг. Основные параметры двигателя ДВ-3000 (рис. 1, а) следующие: внешний диаметр статора – $D_a = 96$ мм; внутренний диаметр статора – $D_i = 64,6$ мм; длина железа якоря и сердечника статора – $l = 50$ мм; толщина постоянных магнитов – $h = 6,5$ мм; величина зазора между статором и ротором – $\delta = 0,8$ мм; число пазов $Z_p = 18$; постоянные магниты – NdFeB ($B_r = 1,17$ Тл); диаметр обмоточного провода – $d_{np} = 1,25$ мм; количество проводников в пазу – $n_{np} = 27$; количество параллельных ветвей $a_1 = 9$; число витков в катушке $w_k = 3$; ток в обмотке статора – $I = 128$ А. Пазы статора выполнены без шлицов.

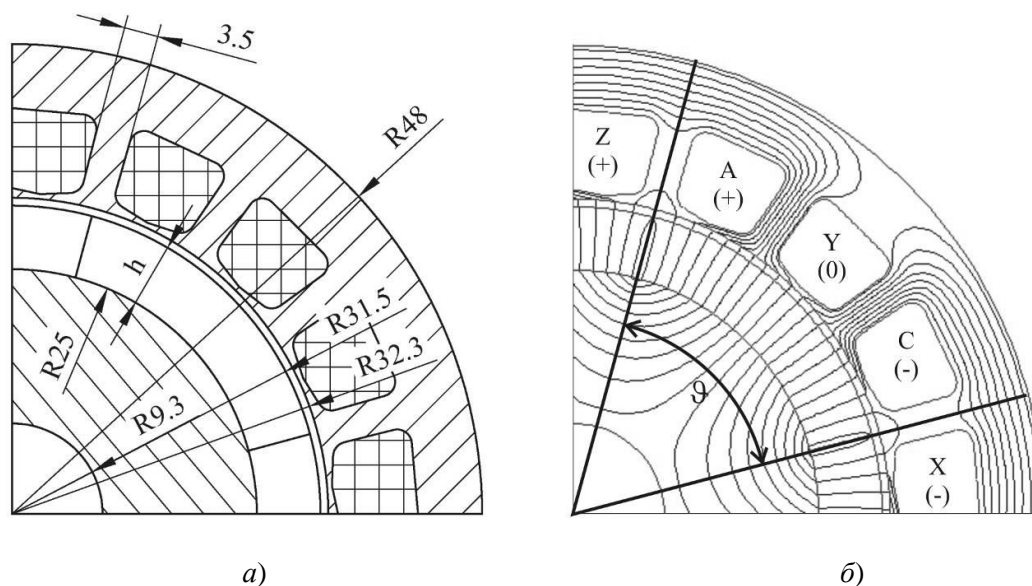


Рис. 1

Моделирование магнитной системы электродвигателя осуществлялось в программном комплексе ELCUT 5.6. Цель первого этапа численного исследования – определение влияния толщины постоянных магнитов на электромагнитный момент электродвигателя с ротором традиционной конструкции. При моделировании магнитной системы для статора задавалась кривая намагничивания стали марки 2411, для ротора – сталь марки СТ3. Фазы статора включены следующим образом: A(+), B(0), C(-); плотность тока задавалась равной $J_c = 4,9$ А/мм², что соответствует реальной плотности тока $J_r = 11,4$ А/мм² при коэффициенте заполнения паза медью – $k_s = 0,43$. Во всех расчетах коэрцитивная сила постоянных магнитов задавалась равной $H_{cb} = 860$ кА/м, магнитная проницаемость магнитов – $\mu_{пм} = 1,05$. На рис. 1, б показана картина магнитного поля в поперечном сечении исследуемого электродвигателя для толщины постоянных магнитов, равной $h = 6,5$ мм и для начального положения ротора (ротор ориентирован по оси d).

В расчетах варьировалась толщина постоянных магнитов в диапазоне $h = 3 \div 10,5$ мм. На рис. 2, а показан график распределения нормальной (радиальной) компоненты магнитной индукции $B = f(\vartheta)$ на линии посередине рабочего зазора в пределах одного полюсного деления τ_p для трех значений толщины постоянных магнитов. Анализируя графики индукции, следует отметить, что от толщины постоянных магнитов индукция зависит не существенно и ее максимальное значение не превышает $B_{max} = 0,5$ Тл. На рис. 2, б показана зависимость электромагнитного момента $M = f(\vartheta)$, действующего на ротор, от угла его поворота. Она вычислялась в диапазоне от оси d (поле соответствующих полюсов ротора направлено согласно с полем, создаваемым включенными фазами статора, $\vartheta = 0^\circ$), до оси q (поле соответствующих полюсов ротора направлено встречно к полю, создаваемому включенными фазами статора, $\vartheta = 60^\circ$). Для исследуемого электродвигателя этот диапазон равен 60° . Для осуществления коммутации фаз двигатель оснащается датчиком положения. Через каждые 20° происходит изменение состояния датчика и выдается команда на включение соответствующих фаз. Алгоритм переключения фаз следующий: A(+), B(0), C(-); A(+), B(-), C(0); A(0), B(-), C(+) и т.д. Таким образом, в пределах зоны коммутации, равной 20° , включаются только две фазы в соответствии с заданным алгоритмом. Как видно из

рис. 2, б, электромагнитный момент, действующий на ротор, также мало зависит от толщины постоянных магнитов.

Для удобства сопоставления результаты исследований сгруппированы в табл. 1, где приведены данные максимальных B_{max} и средних B_{cp} величин продольной компоненты магнитной индукции посередине рабочих зазоров для различных значений толщины h постоянных магнитов, а также масса постоянных магнитов и средний электромагнитный момент.

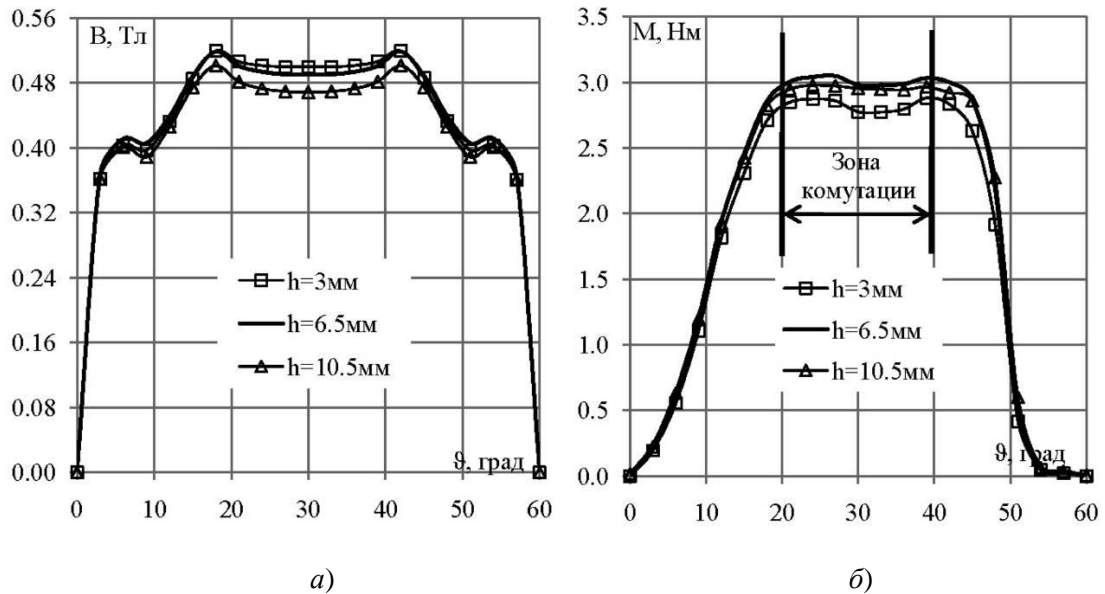


Рис. 2

Таблица 1

h , [мм]	3	6,5	7,5	10,5
B_{max} , [Тл]	0.519	0.518	0.514	0.501
B_{cp} , [Тл]	0.436	0.436	0.439	0.421
$m_{ПМ}$, [кг]	0.211	0.432	0.491	0.628
M_{cp} , [Нм]	2.83	3.01	3.00	2.95

Средняя величина продольной компоненты магнитной индукции на образующей посередине рабочего зазора B_{cp} определяется выражением

$$B_{cp} = \frac{1}{\tau_s} \cdot \int_{-\tau_s/2}^{+\tau_s/2} B(x) dx,$$

где x – продольная координата образующей линии посередине рабочего зазора; τ_s – величина полюсного деления.

Средний электромагнитный момент, действующий на ротор электродвигателя, в пределах зоны коммутации определяется выражением

$$M_{cp} = \frac{1}{\tau_{з.к.}} \cdot \int_{-\tau_{з.к.}/2}^{+\tau_{з.к.}/2} M(x) dx,$$

где x – продольная координата; $\tau_{з.к.}$ – величина зоны коммутации.

Из рассмотрения рис. 2 и табл. 1 следует, что при радиальном намагничивании постоянных магнитов максимальные B_{max} и средние B_{cp} величины продольной компоненты магнитной индукции, а также величина электромагнитного момента не существенно зависят от толщины h постоянных магнитов. Более того, при толщине постоянных магнитов равной $h=10,5$ мм наблюдается даже уменьшение индукции и величины электромагнитного момента по сравнению с толщиной постоянных магнитов исходного варианта – $h=6,5$ мм. С другой стороны, при $h=3$ мм наблюдается незначительное снижение (не более 7%) электромагнитного момента во всем диапазоне перемещения ротора электродвигателя, т.е. снижение массы магнитов по сравнению с исходным вариантом более чем в два раза приводит к весьма незначительному снижению электромагнитного момента, что свидетельствует о возможности использования магнитов с толщиной $h=3$. Однако чтобы постоянные магниты не разруша-

лись от действия центробежных сил (т.к. скорость вращения ротора электродвигателя ДВ-3000 весьма велика ($n=5500$ об/мин)), в исходном варианте была принята их толщина, равная $h=6,5$ мм.

Таким образом, проведенные численные исследования показывают, что при радиальном намагничивании постоянных магнитов на роторе нет существенного увеличения электромагнитного момента в широком диапазоне изменения толщины постоянных магнитов. Поэтому на втором этапе численных исследований рассматривается вариант конструкции ротора с тангенциальным намагничиванием магнитов при неизменной конструкции статора.

Цель второго этапа численного исследования – определение влияния толщины постоянных магнитов на величину электромагнитного момента электродвигателя с ротором, имеющим тангенциальное намагничивание постоянных магнитов. Толщина магнитов при расчетах варьировалась в диапазоне $h=3\div 12$ мм. Магнитная система двигателя с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов показана рис. 3, а. Статор 1 полностью идентичен статору двигателя ДВ-3000 на рис. 1, а. Ротор состоит из восьми постоянных магнитов 2, ферромагнитных концентраторов 3 и немагнитного вала. Наружный диаметр ротора равен $D_p=63$ мм. Ферромагнитные концентраторы выполнены из конструкционной стали марки СТЗ, величина зазора между статором и ротором так же, как и в двигателе на рис. 1, а, равна $\delta=0,8$ мм. Длина железа якоря и сердечника статора – $l=50$ мм. Постоянные магниты призматической формы из NdFeB ($B_r=1,17$ Тл) имеют высоту $b=20$ мм. Для уменьшения пульсаций электромагнитного момента необходимо выполнение скосов на роторе [1]. Скос должен выполняться на величину зубцового деления статора, на рис. 3, а показан вариант выполнения скосов на роторе.

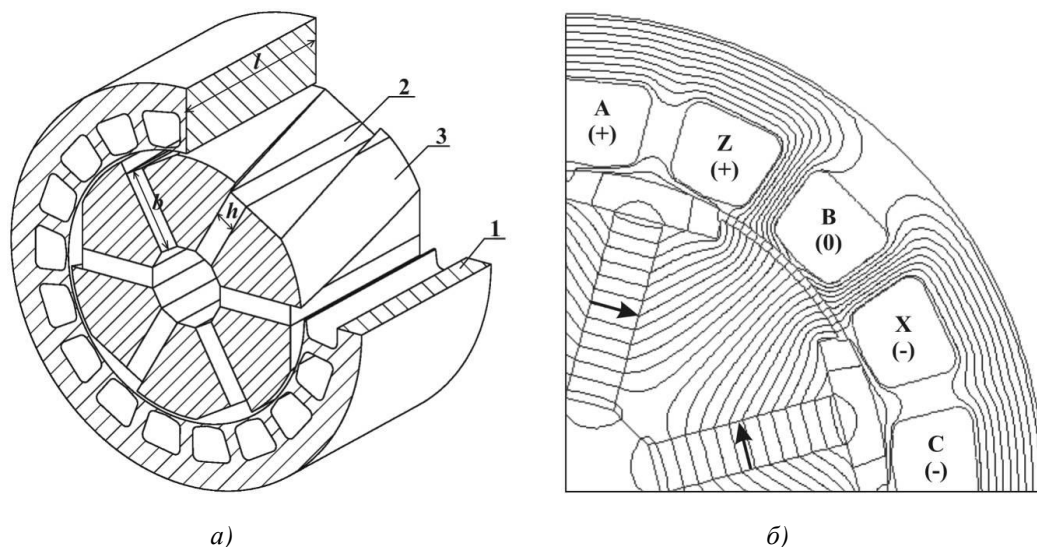


Рис. 3

Расчет магнитного поля и электромагнитного момента для двигателя со скосом пазов должен выполняться в 3-х мерной постановке, например, в программном пакете COMSOL 3.5. Однако при такой постановке оперативной памяти существующих персональных компьютеров, как правило, не достаточно. Поэтому расчеты выполнялись в двумерной постановке в программном комплексе EL-CUT 5.6, при этом расчетная модель разбивалась на пять сечений, для каждого из которых определялась зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора, а результирующий момент определялся методом суперпозиции [2]. На рис. 3, б показана картина магнитного поля в среднем сечении исследуемого электродвигателя при толщине постоянных магнитов равной $h=5,5$ мм, ротор при этом ориентирован по оси d . Векторы намагниченности постоянных магнитов указаны на рис. 3, б стрелками. Фазы статора включены следующим образом: А(+), В(0), С(-). Плотность тока так же, как и для модели двигателя на рис. 1, а, задавалась равной $J_c=4,9$ А/мм².

На рис. 4, а показан график распределения нормальной (радиальной) компоненты магнитной индукции $B=f(\vartheta)$ на линии посередине рабочего зазора в пределах одного полюсного деления τ_s для трех значений толщины постоянных магнитов. Анализируя графики индукции, следует отметить, что тангенциальное намагничивание постоянных магнитов приводит к существенному повышению про

дольной компоненты магнитной индукции в зазоре по сравнению с радиальным намагничиванием магнитов.

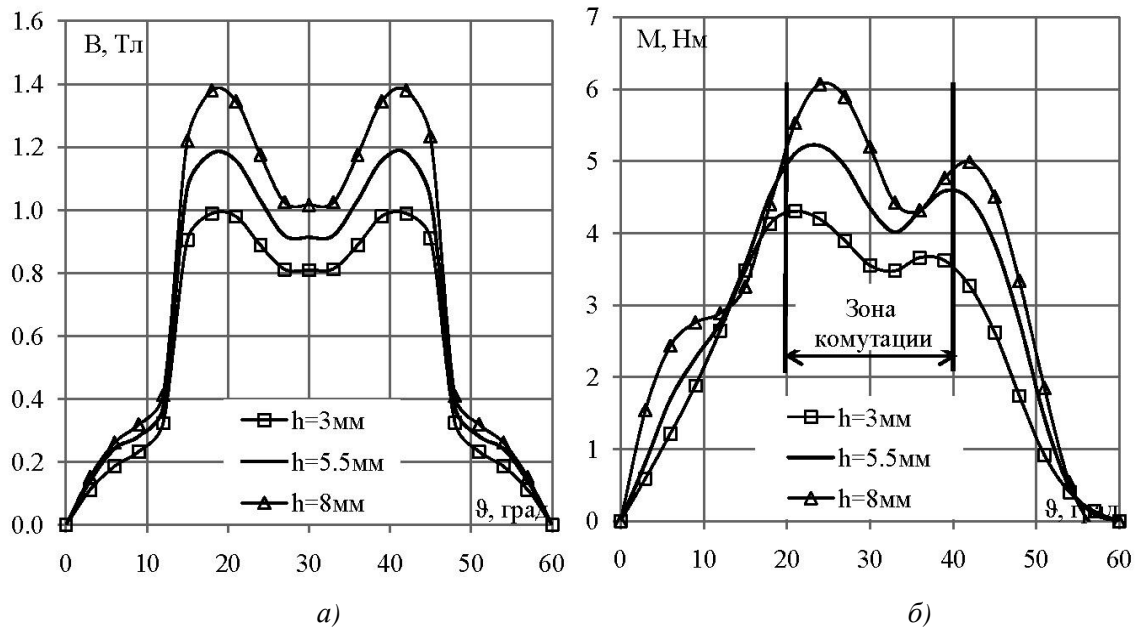


Рис. 4

На рис. 4, б показана зависимость электромагнитного момента $M=f(\vartheta)$, действующего на ротор, от угла его поворота. Положение ротора изменяется от оси d ($\vartheta=0^\circ$) до оси q ($\vartheta=60^\circ$).

Результаты исследований электродвигателя с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов на роторе сведены в табл. 2.

Таблица 2

h , [мм]	3	5,5	7	8	12
B_{max} , [Тл]	0.988	1.18	1.32	1.38	1.511
B_{cp} , [Тл]	0.567	0.666	0.733	0.76	0.81
$m_{ПМ}$, [кг]	0.135	0.248	0.315	0.360	0.486
M_{cp} , [Нм]	3.74	4.62	5.15	4.91	4.75

Это иллюстрируется рис. 5, на котором показана зависимость среднего электромагнитного момента в зависимости от массы постоянных магнитов.

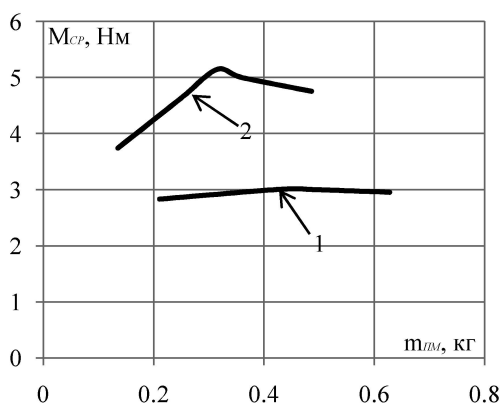


Рис. 5

На этом рисунке кривая 1 соответствует электродвигателю с радиальным намагничиванием постоянных магнитов на роторе (по рис. 1), а кривая 2 – электродвигателю с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов (рис. 3). Анализируя эти кривые, следует отметить, что для электродвигателя с радиальным намагничиванием постоянных магнитов увеличение толщины и соответственно массы постоянных магнитов от 0.211 кг до 0.628 кг не привело к существенному увеличению электромагнитного момента. Как уже отмечалось ранее, в серийном электродвигателе ДВ-3000 была принята толщина постоянных магнитов равная $h=6,5$ мм (этой толщине соответствует масса магнитов $m_{ПМ}=0,432$ кг), исходя из условия механической прочности магнитов от действия центробежных сил.

Тангенциальное намагничивание постоянных магнитов на роторе электродвигателя ДВ-3000 приводит к существенному повышению продольной компоненты магнитной индукции в зазоре и соответственно величины электромагнитного момента. При толщине постоянных магнитов, равной $h=7$ мм, и их массе $m_{ПМ}=0,315$ кг электромагнитное усилие больше в 1,7 раза по сравнению с ротором традиционной конструкции (с магнитами, намагниченными в радиальном направлении).

Выводы. Тангенциальное намагничивание постоянных магнитов на роторе электродвигателя позволяет синтезировать магнитные системы возбуждения, обеспечивающие большие значения электромагнитного момента по сравнению радиальным намагничиванием магнитов. При этом наблюдается максимум электромагнитного момента при определенной толщине магнитов. Поэтому уже на стадии предварительного проектирования следует искать оптимальную конфигурацию магнитной системы, при которой достигается максимум электромагнитного момента.

1. Гребеников В.В., Приймак М.В. Моделирование магнитных полей в электромеханических преобразователях энергии с постоянными магнитами // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – 2009. – №3 (56). – Ч 2. – С. 70–73.

Hrebenikov V.V., Pryimak M.V., Modeling of magnetic fields in electromechanical energy convertors with permanent magnets // Visnyk Kremenchutskoho Derzhavnoho Politekhnichnoho Universytetu imeni M.Ostrogradskoho. – 2009. – № 3 (56). – Ch 2. – P. 70–73. (Ukr.)

2. Гребеников В.В., Приймак М.В. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами // Электротехника и электроэнергетика. – 2009. – №2. – С. 57–60.

Hrebenikov V.V., Pryimak M.V. Research of influence of magnetic system configuration on torque characteristics of electrical drives with permanent magnets // Elektrotehnika i Elektroenergetika. – 2009. – №2. – P. 57–60. (Rus.)

УДК 621.313.17

В.В.Гребеников¹, М.В.Приймак², Ю.В.Шарабан³

^{1,2} – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

³ – Державне підприємство Харківське агрегатне конструкторське бюро,

вул. Сумська, 132, Харків, 61023, Україна

Модифікація магнітної системи електродвигуна ДВ-3000 з постійними магнітами

У роботі проведено чисельне дослідження двох типів магнітних систем електричних двигунів. Запропонований спосіб підвищення магнітної індукції в зазорі електродвигуна ДВ-3000 шляхом формування комбінованої магнітної системи ротора на основі плоских постійних магнітів з тангенціальним намагніченням та феромагнітних концентраторів магнітних потоків. Проведено дослідження впливу товщини постійних магнітів та статичні моментні характеристики двох типів електродвигунів при ідентичних габаритних розмірах статора: з радіальним і тангенціальним намагніченням постійних магнітів у роторі. На основі чисельних досліджень показано, що в електродвигуні з тангенціальним намагніченням постійних магнітів можна в 1,7 раза збільшити електромагнітний момент у порівнянні з електродвигуном з радіальним намагніченням постійних магнітів. Бібл. 2, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: електродвигун, постійний магніт, магнітна система, феромагнітний концентратор.

V.V.Hrebenikov¹, M.V.Pryimak², Yu.V.Sharaban³

^{1,2} – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680 Ukraine.

³ – State Enterprise Kharkov Aggregate Design Bureau,

Sumska st., 132 Kharkov, 61023, Ukraine.

Modifications of magnetic system of electrical drive dv-3000 with permanent magnets

In this paper a numerical investigation of two types of magnetic electric motors is studied. A method for increasing the magnetic induction in the gap of the motor LW-3000 by forming a combined magnetic rotor system based on flat permanent magnets with tangential magnetization and ferromagnetic concentrators of magnetic fluxes is proposed. The influence of the thickness of permanent magnets on the static torque characteristics of the two types of electric motors with identical overall dimensions of stator: radial and tangential magnetization of permanent magnets on the rotor is examined. On the basis of numerical studies have shown that in an electric motor with tangential magnetization of permanent magnets can be 1,7 times larger electromagnetic torque, compared with an electric motor with a radial magnetization of permanent magnets. References 2, tables 2, figures 5.

Key words: electric motor, permanent magnet, magnetic system, ferromagnetic concentrator.

Надійшла 13.07.2010

Received 13.07.2010