

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ С ЭКСЦЕНТРИЧНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

А.Е. Антонов¹, докт. техн. наук, И.С. Петухов², канд. техн. наук, Л.В. Рекстина³, асп.

1–3 – Ин-т электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Предложена нетрадиционная компоновка бесконтактного двигателя магнитоэлектрического типа с постоянными магнитами на роторе и статоре. Особенность двигателя состоит в создании момента вращения без использования источника питания на большей части оборота ротора. Изложен принцип его работы. Построена и исследована двумерная модель магнитной системы двигателя, определены особенности его моментной характеристики, включаются зоны положительного и отрицательного моментов в пределах одного оборота ротора. Установлены соотношения между величинами вращающего и тормозного моментов и их зависимости от геометрии магнитной системы. Библ. 1, рис. 7.

Ключевые слова: бесконтактный двигатель, магнитное возбуждение, эксцентриситет магнитов, моментная характеристика.

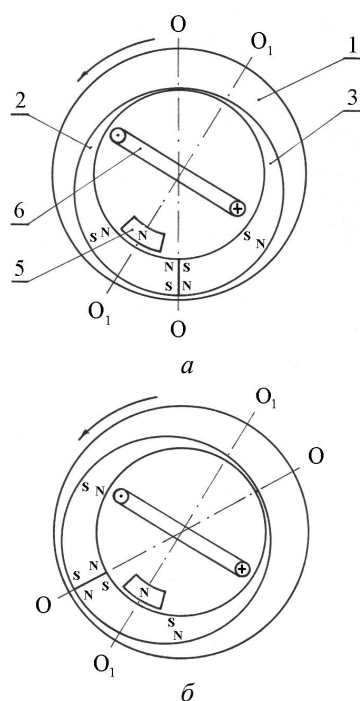


Рис. 1

При построении регулируемых электроприводов весьма эффективными оказались бесконтактные двигатели магнитоэлектрического типа (БМД), ротор которых возбужден постоянными магнитами. Общеизвестными достоинствами таких двигателей являются наивысшая среди других типов двигателей удельная мощность, приведенная к единице объема и потребляемой электроэнергии, высокая перегрузочная способность по току, отсутствие щеточно-коллекторного узла и затрат энергии на возбуждение магнитного потока, т.е. все то, что обуславливает высокие потребительские качества и надежность БМД. Существуют различные варианты построения БМД, которые могут отличаться числом пар полюсов, ориентацией полей ротора и статора относительно оси вращения, расположением магнитопроводов, конфигурацией системы возбуждения. Структура и компоновка БМД определяются назначением и условиями его эксплуатации, а также требованиями, предъявляемыми к электроприводу в целом.

В настоящей статье предлагается нетрадиционная компоновка БМД, обладающего постоянным моментом вращения, которая, по мнению авторов, позволит упростить систему управления двигателем. Постоянный по величине и направлению вращающий момент создается на значительной части обо-

рота ротора только за счет взаимодействия постоянных магнитов при обесточенной обмотке. Для поддержания момента вращения на остальной части оборота необходимо подавать импульс тока в обмотку лишь в небольшом диапазоне угла поворота ротора.

Суть предлагаемого решения состоит в следующем. На статоре двигателя располагается единственный токовый контур и соосный ему постоянный магнит. Ротор двигателя содержит двухполюсную магнитную систему, сформированную таким образом, что радиальная составляющая индукции на поверхности полюсов изменяется на протяжении каждого полюсного деления. В монографии А.Е. Антонова «Двухкоординатные электрические машины для следящих систем» уже рассматривалась структура и принцип работы такого двигателя, однако его исследование и количественная оценка характеристик до сих пор не проводились. На рис. 1 изображена схема предлагаемого двигателя с внешним ротором, система возбуждения которого содержит два секторообразных постоянных магнита 2 и 3 противоположной

полярности, намагниченных в каждой точке радиально и образующих замкнутое кольцо. Наружный и внутренний диаметры магнитов имеют взаимный эксцентриситет в плоскости нейтрали (плоскости стыка секторов). Внешние полюса секторов замкнуты кольцевым магнитопроводом 1, внутренний и внешний диаметры которого также имеют взаимный эксцентриситет, но в направлении, противоположном эксцентриситету магнитов. Благодаря этому магнитная система ротора имеет форму полого цилиндра без эксцентриситета поверхностей. На статоре расположен третий радиально намагниченный постоянный магнит 5 и соосная ему однокатушечная обмотка 6. Переменное сечение магнитов ротора обуславливает не только переменное значение радиальной составляющей магнитной индукции на полюсах, но и наличие переменной тангенциальной составляющей. Очевидно, что индукция в зазоре и запас магнитной энергии системы трех магнитов могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от взаимного положения магнитов 2, 3 и магнита статора 5. При начальном расположении одноименных полюсов ротора и статора 2 и 5 (рис.1 а) и обесточенной обмотке 6 магниты ротора и статора будут стремиться к положению, соответствующему максимуму суммарной магнитной энергии. Поэтому магнит статора 5 будет выталкивать ротор в зону наименьшей радиальной толщины магнита 2. При развороте ротора в положение, при котором нейтраль магнитной системы с минимальной радиальной толщиной расположится против магнита 5, начнется взаимодействие магнита 5 и магнита ротора 3, который имеет противоположную полярность. Магнитная система в этом положении по-прежнему будет стремиться к увеличению суммарной энергии, увеличивая результирующую индукцию в зазоре. Поэтому ротор будет продолжать вращение до положения, при котором против магнита 5 расположится зона максимальной радиальной толщины магнита 3 противоположной полярности (рис.1 б). Так возникает тангенциальная сила, вращающая ротор, который разворачивается относительно магнита статора 5 до тех пор, пока силы взаимного втягивания магнитов 3 и 5 не уравновесятся силой взаимного отталкивания магнитов 2 и 5. Это положение ротора соответствует положению его устойчивого равновесия. Чтобы продолжить вращение ротора, его необходимо вывести из «мертвой» точки, преодолев силу, препятствующую такому движению, т.е. силу отталкивания между магнитами 5 и 2. Для этого служит токовая обмотка 6, которая включается на короткое время, необходимое для выведения ротора из положения равновесия при его пуске и для предотвращения торможения ротора под действием силы отталкивания магнитов 2 и 5 в режиме вращения.

С точки зрения баланса и преобразования энергии в двигателе происходит следующее. Первичная энергия поступает из сети и расходуется на перемещение ротора из положения мертвой точки с преодолением момента противоположного знака. Причем этот противодействующий момент будет нарастать по мере поворота ротора до тех пор, пока не начнет действовать положительный момент взаимодействия магнитов 5 и 2. Далее, по мере поворота ротора, положительный момент будет нарастать и в некоторый момент превысит момент отрицательного знака. С этого момента дальнейшее вращение происходит без потребления энергии извне, только под действием тангенциальной силы взаимодействия магнитов 5 и 2, а затем магнитов 5 и 3. При этом происходят разгон ротора и накопление кинетической энергии. При достижении ротором положения, при котором снова начинает действовать момент противоположного знака, начинается процесс расходования накопленной кинетической энергии, которая, за исключением потерь на сухое и вязкое трение, будет потрачена на работу, совершаемую ротором по преодолению противодействующего момента на некоторой части участка с отрицательным моментом. В силу частичного рассеяния накопленной энергии на преодоление сухого и вязкого трения, ротор принципиально не может «проскочить» весь участок с отрицательным моментом. При полном израсходовании накопленной кинетической энергии и отсутствии поступления энергии извне противодействующий момент в некотором положении превысит момент вращения и ротор начнет движение в обратную сторону, затем перейдет в режим затухающих колебаний вокруг положения устойчивого равновесия, и под действием диссипативных сил остановится. Чтобы ротор не остановился, а продолжал вращение в нужном направлении, необходимо в некотором его положении, близком

к точке остановки, создать момент вращения нужного знака с помощью обмотки б, подключаемой к внешнему источнику на время, необходимое для его выхода из зоны действия этого противодействующего момента.

Для определения моментных характеристик, уточнения угловых диапазонов зон с положительным и отрицательным моментами, а также для установления зависимостей развиваемого момента от соотношений магнитной цепи было предпринято моделирование двигателя методом конечных элементов. Для этого была построена двумерная модель магнитной системы с внутренним диаметром ротора 30 мм, развернутая в линию, которая изображена на рис. 2. Длина двигателя вдоль оси вращения при этом принималась неограниченной.

Система возбуждения ротора составлена из двух магнитов переменного сечения 2 и 3 противоположной полярности, установленных на магнитопроводе 1. На статоре расположен

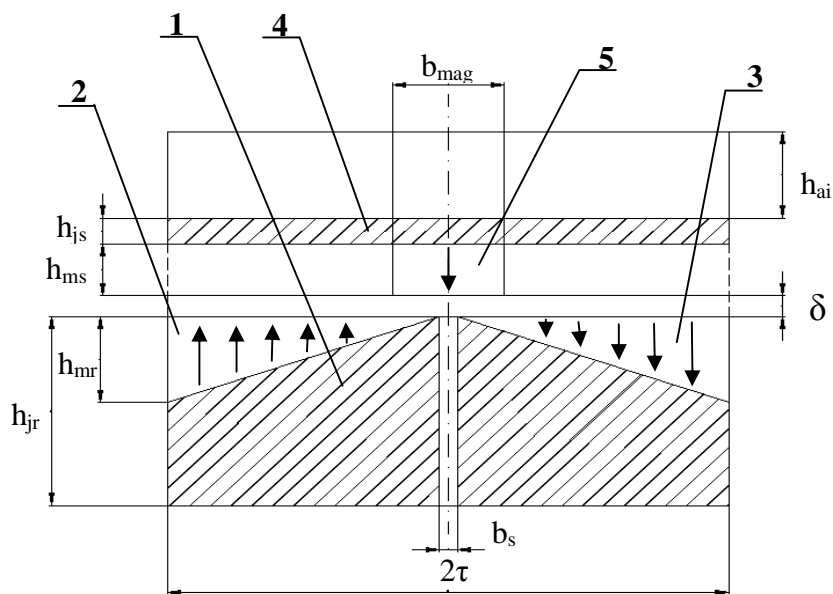


Рис. 2

третий, радиально намагниченный постоянный магнит 5 с магнитопроводом 4. В процессе моделирования устанавливались распределение индукции на полюсах магнитов переменного сечения при включенном магните статора 5, а затем закон изменения величины тангенциальной силы взаимодействия магнитов ротора и статора при изменении их взаимного положения. При исследовании варьировались величина эксцентриситета магнитов ротора (h_{mr}), ширина (b_{mag}) и высота (h_{ms}) магнита статора 5.

Максимальная радиальная толщина ротора h_{jr} была выбрана такой, чтобы при варьировании выбранных переменных сечение магнитопровода удовлетворяло условию ненасыщенности стали марки 2013. Чтобы получить результаты моделирования в обобщенном виде, размеры магнита статора и величину эксцентриситета надо выразить в относительных единицах в виде отношения их длины к длине полюсной дуги τ . Моделирование проведено для интерметаллической композиции NdFeB с параметрами $H_c = 800$ кА/м; $\mu_{Mag} = 1,04$. За точку отсчета относительного положения магнитов статора и ротора принято такое, при котором магнит статора расположен симметрично относительно нейтрали с меньшим значением радиальной толщины магнитов ротора (0°). Зазор δ устанавливался во всех случаях постоянным и составлял $0,02 \tau$. Заметим, что пределы варьирования указанных переменных определяются геометрией поперечного сечения двигателя (рис. 1). В соответствии с этим максимальная высота магнита статора при фиксированном диаметре расточки ротора ограничена этим диаметром, максимальная величина эксцентриситета не ограничена, а ширина полюса магнита статора ограничена величиной полюсного деления ротора. Однако полученные зависимости изменения тангенциальной силы от угла поворота ротора при различных значениях величины относительного эксцентриситета (0,02; 0,04; 0,08; 0,12; 0,2) показали (рис. 3), что хотя при увеличении эксцентриситета абсолютные значения развиваемого усилия возрастают, но уже при h_{mr}/τ более 0,16 нарушается линейность закона его изменения от угла поворота. Момент сначала нарастает до положения, соответствующего симметричному расположению магнита статора относительно нейтрали ротора с минимальной радиальной тол-

щиной, а затем спадает по такому же закону. Такое изменение момента можно объяснить изменением результирующей индукции в зазоре по мере движения разнополярных магнитов ротора относительно магнита статора. В результате чего и тангенциальная сила положительного знака постоянно изменяется.

Из рис. 3 следует, что общая протяженность углового диапазона действия силы положительного знака при сохранении линейности зависимости $F(\alpha)$ составляет $\approx 300^\circ$. Соответственно сила торможения, которая изменяет свое значение от нуля до максимума и снова до нуля, действует на протяжении угла поворота ротора 60° .

В результате варьирования выбранными переменными получены семейства зависимостей развиваемого усилия положительного знака: рис. 4 – зависимости тягового усилия от эксцентриситета ротора h_{mr} для различных величин b_{mag} ; рис. 5 – зависимости тягового усилия от ширины магнита статора b_{mag} при различных эксцентриситетах ротора h_{mr} ; рис. 6 – зависимости тягового усилия от высоты магнита статора h_{ms} при различной ширине магнита статора b_{mag} и величине относительного эксцентриситета 0,02.

На рис. 7 в качестве примера приведена моментная характеристика двигателя при $h_{mr} = 0,04$; $h_{ms} = 0,04$; $b_{mag} = 0,08$ и обесточенной обмотке в пределах полного оборота ротора.

Из рис. 4, 6 видно, что увеличение полюсной дуги магнита статора и эксцентриситета магнитов ротора практически линейно влияет на величину момента вращения двигателя. Увеличение высоты магнита статора приводит к линейному росту момента лишь на небольшом интервале (до $0,08 \tau$). В дальнейшем рост момента замедляется и становится экспоненциальным (рис. 6).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено:

- для выведения ротора из положения устойчивого равновесия и приведения его в зону создания момента вращения необходимо принудительно развернуть ротор, преодолев тормозной момент отрицательного знака, угловая зона действия которого в исследуемой модели составила 60° ;

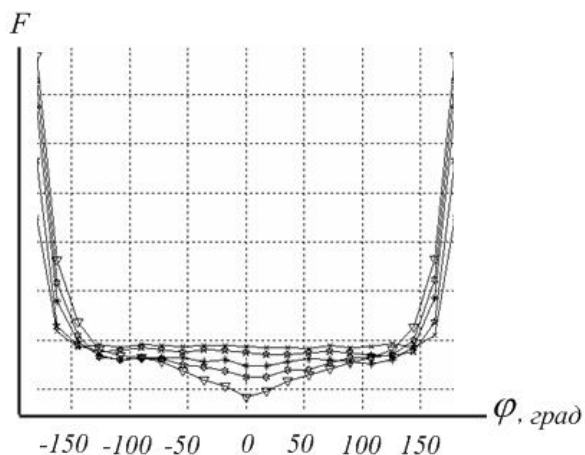


Рис. 3

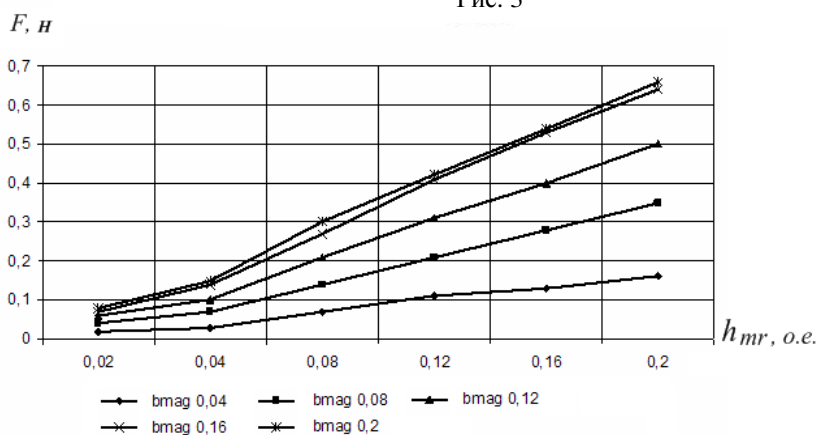


Рис. 4

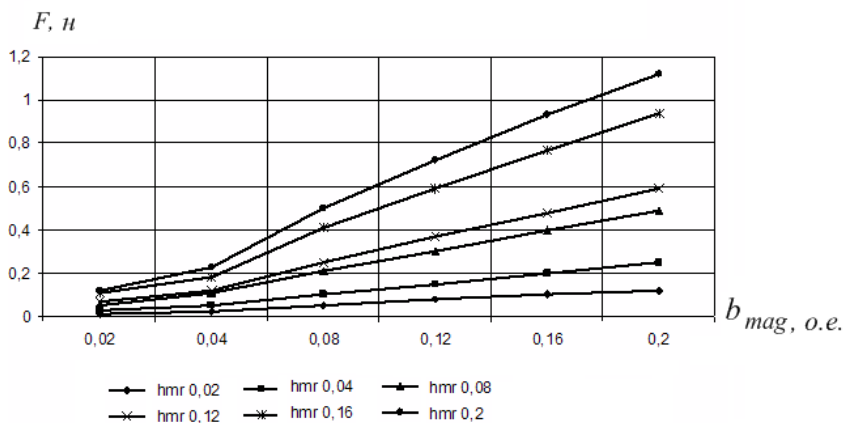


Рис. 5

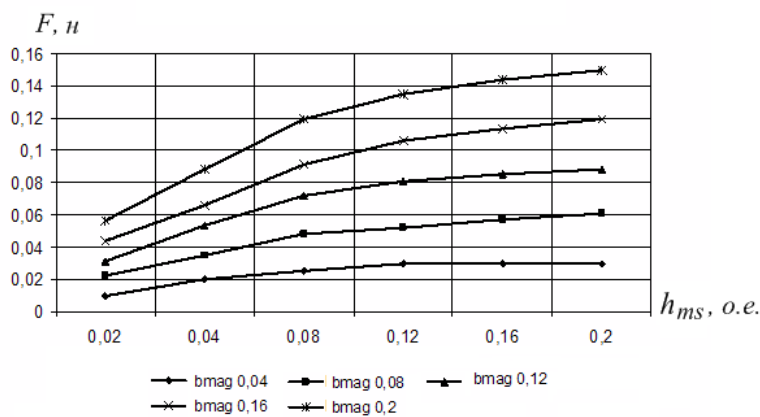


Рис. 6

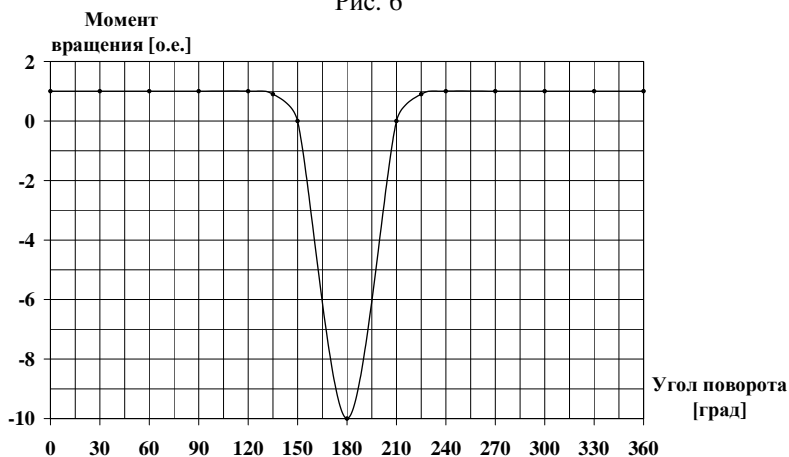


Рис. 7

1. Антонов А.Е. Двухкоординатные электрические машины для следящих систем. – К.: Изд. Ин-та электродинамики НАН Украины, 2000. – 191 с.

УДК 621.313.8

О.Є. Антонов¹, докт. техн. наук, І.С. Петухов², канд. техн. наук, Л.В. Рекстіна³, асп.

1–3 – Ін-т електродинаміки НАН України,

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

Магнітоелектричний двигун з ексцентричною магнітною системою

Запропоновано нетрадиційне компонування безконтактного двигуна магнітоелектричного типу з постійними магнітами на роторі та статорі. Особливість двигуна полягає в створенні моменту обертання без використання джерела живлення на більшій частині оберту ротора. Викладено принцип його роботи. Побудовано і досліджено двовимірну модель магнітної системи двигуна, визначено особливості його моментної характеристики, що включає зони позитивного і негативного моментів у межах одного оберту ротора. Встановлено співвідношення між величинами обертального і гальмівного моментів та їх залежність від геометрії магнітної системи. Бібл. 1, рис. 7.

Ключові слова: безконтактний двигун, магнітне збудження, ексцентриситет магнітів, моментна характеристика.

O.Ye. Antonov¹, I.S. Petuhov², L.V. Rekstina³

1–3 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Magnetolectric motor with eccentric magnetic system

The nonconventional configuration of the contactless engine of magnetolectric type with permanent magnets on the rotor and stator is offered. The feature of the engine consists in the fact that most of the turnover of the rotor torque is created without the use of the power supply. Set out how it works. Is constructed and is investigated two-dimensional model of magnetic system of the engine, the features it torque characteristic including zone of the positive and negative torques are determined within the limits of one revolution of a rotor. The ratio between the rotating and brake torques are established and their characteristics by varying the geometry of the magnetic circuit. Reference 1, figures 7.

Key words: brushless engine, magnetic stimulation, the eccentricity of the magnets, torque characteristics.

- зона создания момента положительного знака составляет 300 угловых градусов, причем момент вращения создается только за счет переменной магнитной структуры ротора без использования внешнего источника энергии;

- амплитудное значение тормозного момента превышает уровень момента вращения в 5...12 раз в зависимости от геометрических соотношений магнитной цепи, а закон его изменения близок к форме равнобедренного треугольника.

Полученные данные позволяют произвести расчет обмотки двигателя для пускового и компенсационного режимов, а также построить и исследовать математическую модель его динамического состояния при конкретных параметрах.

Надійшла 09.02.2012

Received 09.02.2012