

ОДНОФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ЭКСЦЕНТРИЧНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ РОТОРА

А.Е. Антонов, докт. техн. наук, И.С. Петухов, канд. техн. наук, Л.В. Рекстина

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Рассмотрена работа бесконтактного однофазного магнитоэлектрического двигателя с постоянным магнитом ротора переменного сечения. Особенность двигателя состоит в однополярном прерывистом питании обмотки управления. Изложен принцип его работы, исследована модель магнитной системы, определен алгоритм коммутации обмотки управления. Построена модель энергетического состояния электромагнитной системы двигателя. Рассмотрена возможность определения электромагнитных моментов через изменение взаимной магнитной энергии системы. Библи. 4, рис. 3.

Ключевые слова: бесконтактный двигатель, магнитное возбуждение, градиент магнитной индукции, магнитная энергия.

В работе [1] рассмотрен принцип работы магнитоэлектрического двигателя, двухполюсная магнитная система ротора которого характеризуется градиентом радиальной и тангенциальной составляющих магнитного поля вдоль полюсов 2 и 3 (рис. 1). Градиент создан за счет эксцентриситета между центрами внутренней и внешней окружностей кольца, образованного полюсами, в плоскости нейтрали (ось $O-O$). Благодаря взаимодействию такой магнитной системы и постоянного магнита статора 5 возникает тангенциальная сила, создающая момент вращения на протяжении угла γ , близкого к 300 угловым градусам. Однако в пределах угла $2\pi - \gamma$ на ротор действует противодействующий момент, который необходимо компенсировать. Этот момент возникает в результате взаимодействия магнита статора 5 и одноименного с ним полюса ротора 2 в конце углового диапазона γ (положение рис. 1 б). Причем противодействующий момент, как показали исследования, в 5...12 раз превышает момент вращения положительного знака [1]. В этом состоит первый недостаток такого двигателя.

Второй недостаток двигателя заключается в сложности регулирования момента на валу в процессе вращения ротора, так как момент взаимодействия ротора и статора фактически задается геометрией элементов двигателя и параметрами применяемого магнитотвердого материала.

Эти недостатки можно устранить, если постоянный магнит статора заменить второй токовой обмоткой, как показано на рис. 2. При этом алгоритм работы двигателя становится несколько иным, чем в работе [1].

При обесточенных обмотках 5 и 6 ротор не имеет какой-либо определенной ориентации, его положение случайно. Для пуска двигателя в направлении, показанном стрелками на рис. 2, обмотку 5 необходимо подключить к источнику постоянного тока такой полярности, при которой ротор установится в положение устойчивого равновесия, соответствующее рис. 2 а. Назовем его первым положением устойчивого равновесия. Для приведенных направлений намагничивания постоянных магнитов ротора эта полярность тока соответствует рис. 2 а. Направление тока в обмотке 5 при этом будет противоположным тому, которое должно обеспечить вращение ротора в требуемом направлении (показанном стрелками). Теперь, чтобы начать вращение ротора

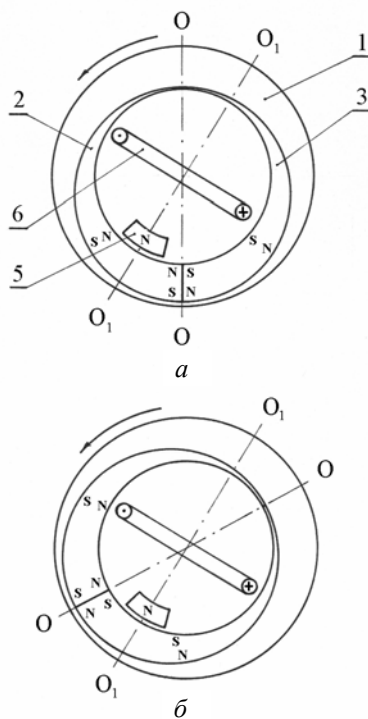


Рис. 1

из этого положения в требуемом направлении, необходимо не только изменить направление тока в обмотке 5 на противоположное, но одновременно, чтобы предотвратить реверсирование ротора, кратковременно создать с помощью обмотки 6 усилие, которое подтолкнет ротор в нужном направлении. Для этого полярность тока в обмотке 6 должна соответствовать рис. 2 б. Далее, так же, как и в двигателе с двумя постоянными магнитами, вращение ротора будет происходить под действием момента взаимодействия поля обмотки 5 и поля эксцентричного магнита до тех пор, пока ротор не окажется в положении, показанном на рис. 2 в. В этом положении момент вращения будет уравновешен противодействующим моментом взаимного отталкивания магнита 2 и обмотки 5, т.е. ротор окажется во втором положении устойчивого равновесия. Противодействующий момент нарастает по мере приближения к этому положению от нулевого значения до значения, равного моменту вращения, действующему в пределах некоторого углового диапазона γ_2 . Чтобы исключить воздействие на ротор нарастающего противодействующего момента на этом диапазоне, необходимо обесточить обмотку 5 несколько ранее, т.е. после поворота ротора на угол $\gamma - \gamma_2$. Далее ротор будет продолжать вращение по инерции до точки первого устойчивого равновесия. Но следующее включение обмотки 5 должно произойти не в этой точке равновесия, а несколько позже, после поворота ротора на угол γ_3 , когда невозможно создание противодействующего момента из-за взаимодействия обмотки 5 и магнита 3. Угол γ_3 – угол, в пределах которого спадал бы противодействующий момент при постоянно включенной обмотке 5. Таким образом, угол, на который должен повернуться ротор по инерции, составляет $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$. Причем $\gamma_3 = \gamma_2$ [1]. После поворота ротора по инерции на этот угол обмотка 5 снова подключается к источнику постоянного тока нужной полярности, т.е. соответствующей рис. 2 в. Таким образом, цикл вращения повторяется. Обмотка 6 необходима только для пуска ротора, рассеяние электроэнергии в ней невелико, поскольку в функции пусковой обмотки не входит компенсация противодействующего момента, как в двигателе с двумя постоянными магнитами. Величина углового диапазона γ_2 определяет также и время, на которое включается пусковая обмотка 6.

С учетом изложенного циклограмма токов в обмотках 5 и 6, момента вращения и угловой скорости двигателя с регулируемой обмоткой возбуждения имеет вид, показанный на рис. 3. Коммутация обмотки 5 осуществляется по сигналам датчиков положения ротора. По сути, мы получили бесконтактный магнитоэлектрический двигатель с пусковой обмоткой и однофазной обмоткой управления, но с необычной магнитной системой ротора. Отличие этого двигателя от традиционного однофазного с симметричной магнитной системой ротора состоит в том, что по обмотке протекает не переменный, а прерывистый ток постоянного направления. В таком двигателе, в отличие от [1], уже возможно управление мо-

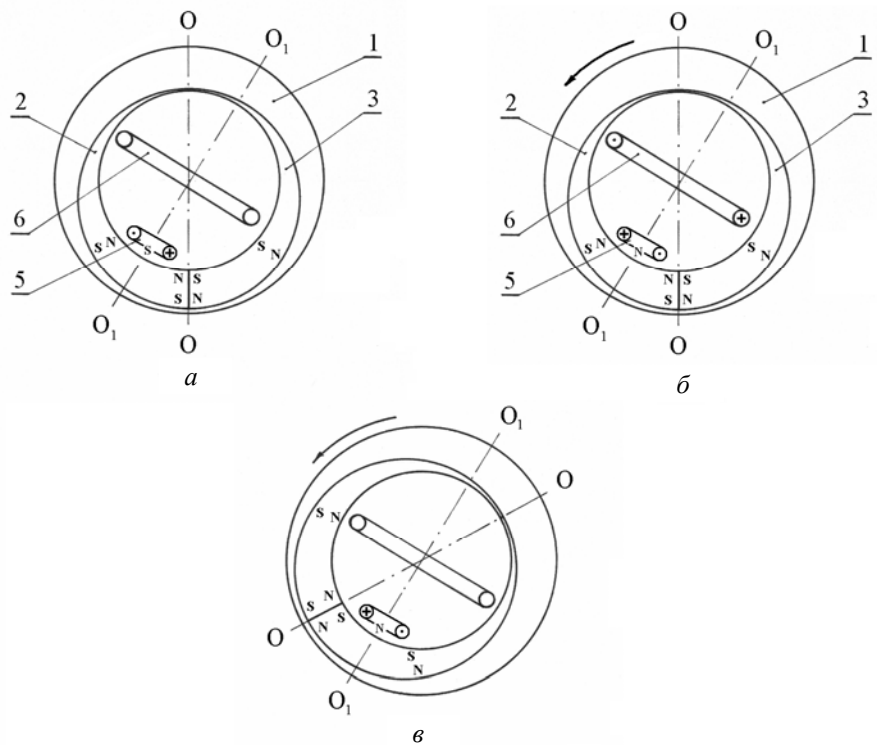


Рис. 2

ментом вращения путем регулирования величины тока возбуждения обмотки 5. Кроме того, этот двигатель реверсируем. Для изменения направления вращения необходимо лишь изменить направление тока в обмотке 5 и соответственно в пусковой обмотке 6.

Для определения углов $\gamma, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ и закона изменения момента вращения была построена двумерная модель активной зоны двигателя кольцевой формы, соответствующая рис. 1, внутренний диаметр которой составляет 30 мм. Длина двигателя вдоль оси вращения принималась неограниченной. В результате моделирования получены следующие величины искомых углов: $\gamma_1 = 70$ град., и $\gamma_3 = \gamma_2 = 15$ град. Таким образом, время, на которое включается обмотка 5, соответствует времени поворота ротора на угол 260 град. Дальнейший поворот в пределах угла 100 град. происходит по инерции.

Для описания энергетического состояния рассматриваемой электромагнитной системы и вычисления движущих сил, порождаемых полями обмотки статора и магнитов ротора, воспользуемся выражением энергии для системы «постоянный магнит – обмотка» [3], применительно к конфигурации рассматриваемого двигателя, присвоив элементам системы индексы, соответствующие нумерации рис. 2:

$$W_{25} = \frac{G_2 \cdot I_{r02}^2}{2 \operatorname{tg} \chi} + \frac{L_5 \cdot i_5^2}{2} - \left(\frac{G_2}{\operatorname{tg} \chi} + G_{25} - G_{p2} \right) \frac{I_{n2}^2}{2} - G_{25} \cdot w_5 \cdot i_5 \cdot I_{n2}, \quad (1)$$

где G_{25} – взаимная проводимость магнита 2 и обмотки 5; G_2 – собственная проводимость магнита 2; G_{p2} – результирующая проводимость всей магнитной цепи, на которую работает магнит 2; w_5 – число витков обмотки; i_5 – ток в обмотке – *const*; I_{n2} – полный поверхностный ток магнита; I_{r02} – поверхностный ток при обесточенной обмотке; χ – угол наклона

прямой намагниченности; $\operatorname{tg} \chi = \left(\frac{\rho}{\mu_0} \right) - 1$; ρ – коэффициент возврата.

Это выражение для магнитной энергии учитывает независимо два фактора, влияющих на состояние магнита: наличие внешнего источника поля и естественное размагничивание под действием воздушного зазора.

Первые два члена в выражении (1) представляют собой собственную энергию магнита 2 и обмотки 5 при отсутствии внешней МДС. Третий член показывает влияние воздушного зазора на состояние магнита 2. Последний член характеризует взаимную энергию магнита 2 и обмотки 5. Взаимная энергия взята со знаком “минус”, поскольку поля магнита и обмотки направлены встречно. Для магнита 3 и обмотки 5 выражение магнитной энергии будет иметь такой же вид, но взаимная энергия должна быть взята со знаком “плюс”. Заметим следующее. Понятие поверхностного тока, введенное при идентификации магнита токовым слоем [2], носит интегральный характер, и постоянство его величины для отдельных частей магнита справедливо для случая постоянной длины магнита вдоль оси намагничивания по всему

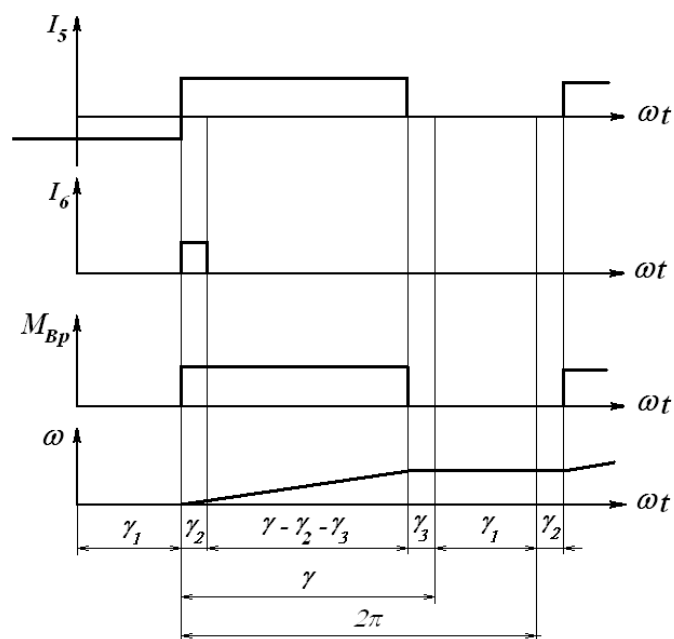


Рис. 3

такой же вид, но взаимная энергия должна быть взята со знаком “плюс”. Заметим следующее. Понятие поверхностного тока, введенное при идентификации магнита токовым слоем [2], носит интегральный характер, и постоянство его величины для отдельных частей магнита справедливо для случая постоянной длины магнита вдоль оси намагничивания по всему

поперечному сечению. Если же длина магнита l_m переменна, как в рассматриваемом случае, то при однородном намагничивании величина поверхностного тока, определяемая как $I_n = J \cdot l_m$, также должна быть переменной по его поперечному сечению. Подобную аналогию невозможно представить для цепей электрического тока, однако в случае постоянного магнита можно сделать допущение о неодинаковости величины его поверхностного тока, если представить магнит в виде элементарных магнитов, имеющих различную длину. При этом интегральное значение поверхностного тока для магнита в целом определяется как сумма поверхностных токов элементарных магнитов. Поэтому в соответствии с изложенным под I_{r02} и I_{n2} в выражении энергии (1) нужно понимать некоторые интегральные значения поверхностных токов магнита 2. В соответствии с принятой структурой двигателя радиальная толщина магнитов 2 и 3 изменяется в пределах их полюсных делений величиной π линейно. Примем также постоянной величину намагниченности (плотности поверхностного тока) J_{r02} . За точку отсчета угла примем второе положение устойчивого равновесия, т.е. ось O_1-O_1 (рис. 2 в). Тогда величина полного поверхностного тока элементарных магнитов, на которые разбиты полюсные элементы 2 и 3, тоже будет меняться по линейному закону в соответствии с изменением радиальной толщины полюса от максимального до нулевого значения в пределах полюсного деления π :

$$I_{r02}(\gamma) = J_{r0} \cdot l_0 \left(\frac{2\pi + \gamma_1 - 2\gamma}{2\pi} \right), \quad \gamma \in \left[\frac{\gamma_1}{2}; \pi + \frac{\gamma_1}{2} \right];$$

$$I_{r03}(\gamma) = J_{r0} \cdot l_0 \left(\frac{-2\pi - \gamma_1 + 2\gamma}{2\pi} \right), \quad \gamma \in \left[\pi + \frac{\gamma_1}{2}; 2\pi + \frac{\gamma_1}{2} \right],$$

где γ – текущее значение угла; l_0 – наибольшая длина магнита в плоскости эксцентриситета (при $\gamma - \gamma_1/2$), одинаковая для магнитов 2 и 3.

Тогда полные поверхностные токи I_{r0}^2 и I_{r0}^3 с учетом идентичности форм магнитов 2 и 3 запишутся как

$$I_{r0}^3 = I_{r0}^2 = \int_{\frac{\gamma_1}{2}}^{\pi + \frac{\gamma_1}{2}} I_{r0}^2(\gamma) d\gamma = \frac{J_{r0} \cdot l_0 \cdot \pi}{2}. \quad (2)$$

Во время вращения ротора происходит взаимное перемещение магнитов 2, 3, имеющих переменное сечение, и обмотки 5 с постоянным током. Синхронно с движением будет изменяться и их взаимная проводимость, поэтому магнитная энергия рассматриваемой системы будет зависеть от трех параметров, являющихся функциями угла γ – двух поверхностных токов I_{r02} , I_{r03} и взаимной проводимости магнитов и обмотки G_{25} . Для вычисления искомого момента вращения путем дифференцирования выражения магнитной энергии системы по угловой координате, необходимо предварительно установить расчетным путем законы изменения взаимных проводимостей для конкретных параметров магнитной системы. Если же в двигателе применяются высококоэрцитивные интерметаллические соединения типа $SmCo5$, $NdFeB$, которые в рабочем диапазоне на линии возврата практически не поддаются внешнему воздействию, то

$$\rho = (1,02 \div 1,04) \approx 1, \quad tg\chi \approx 0. \quad (3)$$

В соответствии с этим полные поверхностные токи магнитов будут оставаться неизменными и равными I_{r0} , а изменение магнитной энергии системы будет определяться только изменением взаимной энергии магнитов и обмотки. При постоянстве элементарных поверхностных токов магнитов и постоянстве тока в обмотке 5 взаимная энергия рассматриваемой системы будет зависеть только от их взаимной магнитной проводимости G_{25} и G_{35} .

Тогда выражение для момента вращения в двигателе с эксцентричной магнитной системой примет вид

$$M_B(\gamma) = \frac{\partial W}{\partial \gamma} = -I_{r02} \cdot i_5 \cdot w_5 \frac{\partial G_{25}(\gamma)}{\partial \gamma} = I_{r03} \cdot i_5 \cdot w_5 \frac{\partial G_{35}(\gamma)}{\partial \gamma}. \quad (4)$$

Таким образом, задача аналитического расчета момента взаимодействия двух магнитов сводится к установлению закона изменения взаимных проводимостей магнитов 2, 3 и обмотки 5 в зависимости от угла поворота ротора. Расчет проводимостей представляет собой инженерную задачу и может быть произведен с использованием решений для типичных конфигураций элементов магнитных систем [4].

1. Антонов А.Е., Петухов И.С., Рекстина Л.В. Магнитоэлектрический двигатель с эксцентричной магнитной системой // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2012. – Вип. 31. – С. 62–66.
2. Барабанов В.А. Основные модели постоянного магнита в электромеханических системах. – Киев, 1980. – 50 с. – (Препр. АН УССР/ Ин-т электродинамики; № 222).
3. Барабанов В.А. Энергия постоянного магнита // Техн. электродинамика. – 1989. – № 5. – С. 3–13.
4. Постоянные магниты. Справочник / Под ред. Ю.М. Пятиня. – М.: Энергия, 1980. – С.108.

О.Є. Антонов, докт. техн. наук, **І.С. Петухов**, канд. техн. наук, **Л.В. Рекстіна**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Однофазный двигатель постоянного тока с эксцентричной магнитной системой ротора

Розглянуто роботу безконтактного однофазного магнітоелектричного двигуна з постійним магнітом ротора змінного перетину. Особливість двигуна полягає в однополярному перервному живленні обмотки управління. Викладено принцип роботи двигуна, досліджено модель магнітної системи, визначено алгоритм комутації обмотки управління. Побудовано модель енергетичного стану електромагнітної системи двигуна. Розглянуто можливість визначення електромагнітних моментів через зміну взаємної магнітної енергії системи. Бібл. 4, рис. 3.

Ключові слова: безконтактний двигун, магнітне збудження, градієнт магнітної індукції, магнітна енергія.

O. Antonov, I. Petuhov, L. Rekstina

Institute of electrodynamic National Academy of Science of Ukraine
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Single-phase direct current machine with eccentric magnetic system of the rotor

The operation of brushless single-phase magneto-electrical engine with permanent magnets on the rotor is considered. The feature of engine consists of single-polarity irregular feed of control winding. Principle of his work is expounded. The model of the magnetic system is investigational, the commutation algorithm of control winding is certain. The model of the power state of the electromagnetic system of engine is built. Possibility of determination of electromagnetic moments is considered through a change mutual magnetic energy of the system. References 4, figures 3.

Key words: brushless engine, magnetic excitation, gradient of magnetic induction, magnetic energy.

Надійшла 21.08.2013

Received 21.08.2013