

УДК 62.1.31

Дисковый вентильный электродвигатель с печатной обмоткой разомкнутого типа

Ситников А. В.^{1,*}, Баранов Е. Н.¹

[*sit_inna@mail.ru](mailto:sit_inna@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье авторы анализируют достоинства и недостатки существующих вентильных двигателей, используемых в системах регулирования оптико-электронных приборов. На основе проведенного анализа авторами предлагается конструкция дискового вентильного электродвигателя с печатной обмоткой разомкнутого типа, обладающего пониженным уровнем пульсации электромагнитного момента, малыми габаритами и работающим при пониженном напряжении питания, что позволяет использовать его в составе мобильных электромеханических устройств. В статье подробно рассматривается конструкция электромагнитной системы двигателя, представлена конфигурация статорной печатной обмотки разомкнутого типа, проведена оценка величины крутящего момента электродвигателя. Предлагаемая конструкция двигателя удовлетворяет требованиям предъявляемым к исполнительным элементам современных системах управления и может быть использована в прецизионных системах автоматики.

Ключевые слова: вентильный двигатель, ротор, статор, печатная обмотка разомкнутого типа, число пар полюсов, датчик Холла, датчик углового положения ротора, электромеханический крутящий момент

Введение

В качестве исполнительных элементов систем регулирования оптико-электронных приборов широко применяют вентильные электродвигатели [1, 2]. Это обусловлено тем, что эти двигатели обладают высоким быстродействием, большим пусковым моментом, линейностью регулировочной характеристики, высокой надежностью. При использовании электродвигателей в современных системах управления к ним предъявляются также дополнительные требования, к которым можно отнести отсутствие пульсаций электромагнитного момента, малые габариты и пониженное напряжение питания. Рассматриваемый вентильный электродвигатель удовлетворяет этим требованиям в полном объеме.

Вентильный двигатель представляет собой электромеханическую систему, состоящую из статора с фазными обмотками и ротора, на котором установлены

постоянные магниты. В структуру вентильного двигателя включают также систему управления напряжением, подаваемым на фазные обмотки. Система управления содержит коммутатор фазных обмоток (обмоток якоря), силовые ключи и датчики углового положения ротора.

Конструктивно вентильные двигатели схожи с синхронными машинами, однако управление скоростью вращения ротора в вентильных двигателях осуществляется с использованием цепи обратной связи. По своим характеристикам вентильные двигатели идентичны характеристикам бесколлекторных двигателей постоянного тока. Как для двигателей постоянного тока, так и для вентильных двигателей характерно свойство пульсации электромагнитного момента, что существенно сужает область применения этих двигателей в прецизионных системах слежения.

С целью уменьшения неравномерности вращения ротора, которая не должна превышать 0.01% от номинальной скорости, в рассматриваемом вентильном электродвигателе предусмотрено число пар полюсов системы возбуждения не менее $p = 6$, а число секций обмотки якоря выполняется не менее трех (с возможностью увеличения их числа). С этой же целью статор не должен содержать ферромагнитных деталей магнитопровода и выполняется по беспазовой схеме с использованием немагнитного диска из стеклотекстолита или керамики. С целью снижения габаритов двигателя обмотки статора выполняются плоскими с печатными проводниками. Ротор при этом должен состоять из постоянных магнитов и вращающихся вместе с ними монолитных деталей магнитопровода.

Для удобства применения электродвигателя в составе мобильных устройств напряжение питания не должно превышать пяти вольт.

Конструкция электродвигателя

Основные элементы конструкции электродвигателя представлены на рис. 1.

На полом валу 1 со сквозным внутренним отверстием, обеспечивающим осевую установку оптических элементов, закреплен ротор электродвигателя, выполняющий функцию индуктора и состоящий из двух элементов торцевой магнитной системы, между которыми жестко закреплена шайба 2 статора с нанесенной на нее печатной обмоткой якоря. В немагнитных алюминиевых шайбах 3, 4 помещены цилиндрические постоянные магниты 5, 6, 7, 8 системы возбуждения. В каждой шайбе по двенадцать равномерно расположенных постоянных магнитов, соответственно выбранному числу пар полюсов $p = 6$. Шайбы 3, 4 примыкают к кольцевым магнитопроводам 9, 10, выполненным из стали типа ст10. Детали 5-10 составляют активную часть переменнопольсной системы возбуждения торцевого типа. На внутренней поверхности одного из элементов 11, 12 корпуса электродвигателя крепится специальная изолирующая подложка 15, на которой размещены датчики Холла 16, входящие в систему датчика углового положения ротора (ДПР). Подвижная часть конструкции вращается в подшипниках 13, 14.

В конструкциях вентильных электродвигателей с печатной обмоткой на дисковом статоре чаще всего используется волновая обмотка. Этот вариант предлагается к применению и для данного электродвигателя. При этом электронный коммутатор в комплекте с такой обмоткой полностью воспроизводит функции электромеханического коллектора традиционной машины постоянного тока. Такая обмотка представляет собой замкнутый контур с подключением к источнику питания в двух точках и с образованием двух параллельных ветвей, в каждую из которых входит несколько секций. Такая схема требует повышенного напряжения питания, что ограничивает применение двигателя при использовании малогабаритных автономных источников питания. Кроме того, коммутатор выполняет довольно сложную функцию циклического переключателя выходных клемм источника питания [3, 4], что снижает надежность системы и увеличивает ее стоимость.

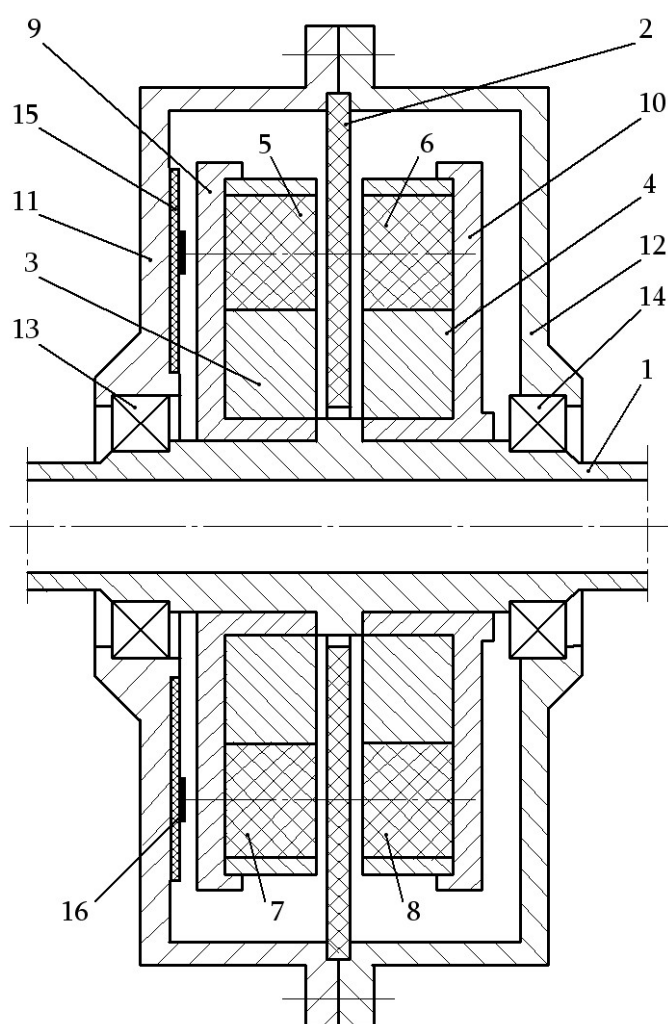


Рис. 1 Конструктивная схема вентильного электродвигателя (продольный разрез)

Существенно проще решается задача коммутации токов в секциях обмотки якоря разомкнутого типа, где ток каждой секции коммутируется отдельным каналом управления. Число таких независимо работающих каналов равно числу секций.

Разумеется, такая обмотка будет иметь преимущества перед волновой обмоткой только в том случае, если площадь, занимаемая активными печатными проводниками на поверхности диска статора, не меньше, чем у волновой обмотки.

Конструкция печатной обмотки разомкнутого типа

Конструктивная схема разработанной для данного электродвигателя печатной обмотки статора разомкнутого типа представлена на рис. 2, 3. Обмотка рассчитана на использование с двенадцатиполусной системой возбуждения (число пар полюсов $p = 6$, полюсное деление $\tau = 30^\circ$). Предусмотрено пять сдвоенных секций обмотки статора, одна из которых изображена на рис. 2.

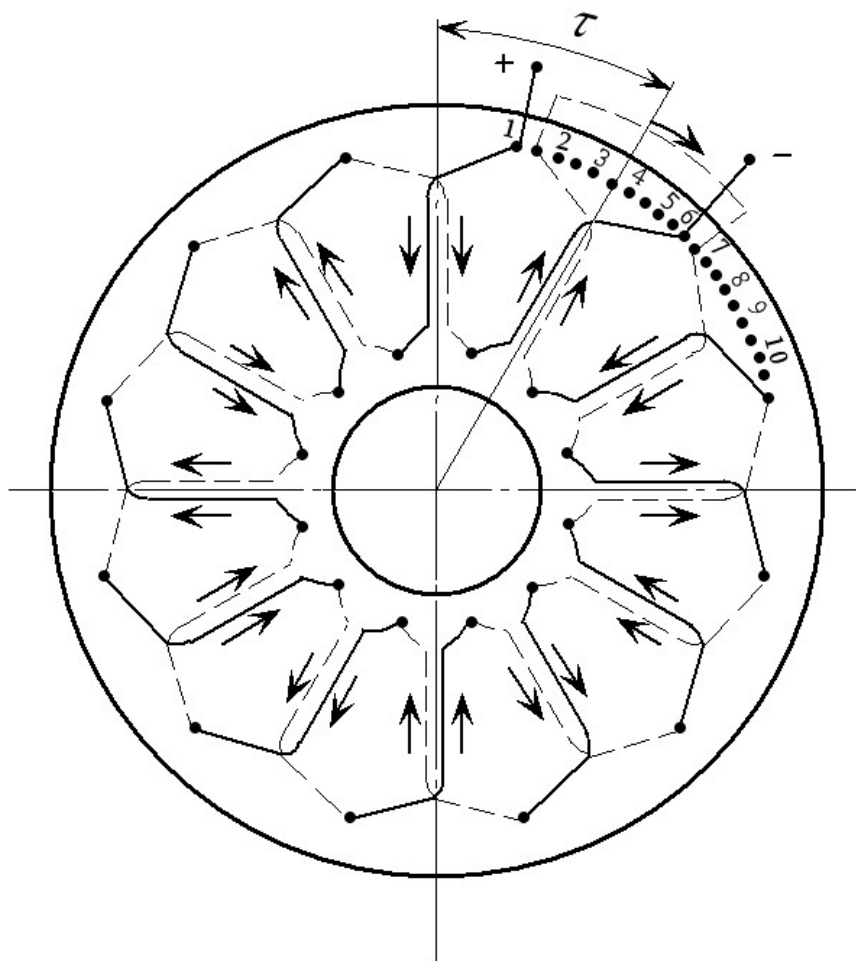


Рис. 2 Схема соединений для одной сдвоенной секции печатной обмотки статора разомкнутого типа

Проводники, расположенные на видимой поверхности диска статора, показаны сплошными линиями, на обратной стороне – пунктирными. Точками отмечены сквозные контакты, служащие для соединения проводников, расположенных на обеих поверхностях диска, и для соединения концов секций с выходными клеммами соответствующих каналов переключения токов.

Каждая из пяти сдвоенных секций обмотки статора состоит из двух полусекций. Показанная на рис. 2 секция состоит из полусекций 1 и 6. Цифрами от 1 до 10 отмечены начала полусекций, справа от них показаны клеммы, куда выводятся концы соответствующих полусекций. Таким образом, конец первой полусекции соединен на задней поверхности диска с концом полусекции 6 (а не вне площади диска, как условно показано на рисунке). Такое соединение обеспечивает одинаковое направление токов в противоположащих проводниках на обеих поверхностях диска статора. Направление токов отмечено на рисунке 2 стрелками. Аналогичным образом соединены полусекции 2, 7 ... 5, 10.

На рис. 3 представлена конструктивная схема печатной обмотки на одной из сторон диска статора, аналогичная схема на другой стороне диска.

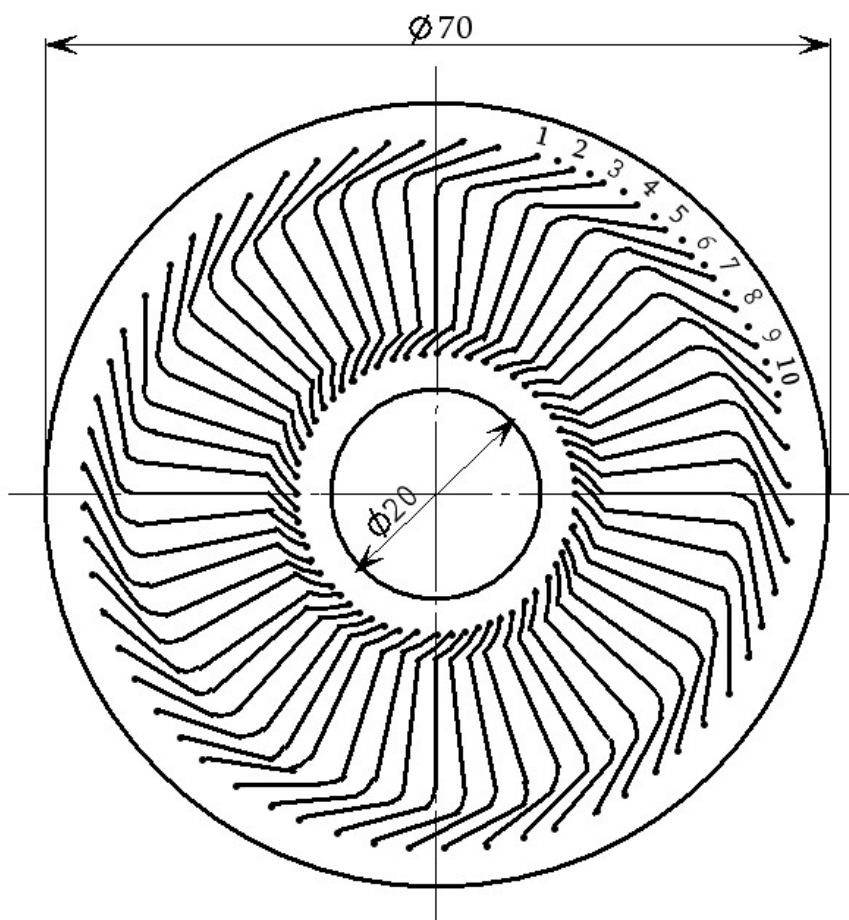


Рис. 3 Конструктивная схема печатной обмотки разомкнутого типа.

Можно видеть, что плотность заполнения поверхности диска активными проводниками здесь максимально возможная для однослойной обмотки.

Оценка величины крутящего момента электродвигателя

Расчет имеет целью оценить величину достижимого электромагнитного момента двигателя, исходя из выбранной конструкции печатной обмотки якоря. Так как активные

проводники обмотки ориентированы радиально, наиболее узким местом является поперечная поверхность проводников по минимальному внутреннему диаметру d_1 . Выберем значение $d_1 = 30$ мм. Внешняя окружность, условно соединяющая концы активных проводников, имеет диаметр $d_2 = 54$ мм. Таким образом, активная длина радиальных проводников $l = 12$ мм.

Длина внутренней окружности $l_1 = \pi d_1 = 94.2$ мм. Будем считать, что поперечные размеры проводников с каждой стороны шайбы статора составляют половину длины l_1 (вторая половина занята изоляционными промежутками). Тогда при количестве проводников с каждой стороны $n = 60$ поперечный размер одного проводника составит величину $\frac{l_1}{120} \approx 0.7$ мм. Толщина проводящего слоя равна 0.1 мм. Тогда минимальное поперечное сечение одного проводника $S_{\text{пр}} = 0.07$ мм². Плотность тока в печатной обмотке может достигать 30÷40 А/мм². Выберем значение 30 А/мм². Ток в отдельном активном проводнике при этом равен $I_{\text{пр}} = 30 \cdot 0.07 = 2.1$ А.

Расчет магнитной цепи двигателя показывает, что даже в случае применения в системе возбуждения высококоэрцитивных постоянных магнитов из-за наличия сравнительно большого немагнитного зазора значение магнитной индукции не превышает величины $B = 0.6$ Тл. Тогда электромагнитная сила, действующая на отдельный активный проводник, равна $F_{\text{пр}} = BI = 0.6 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 2.1 = 0.0151$ Н.

Средний радиус активной части проводника $R_{\text{ср}} = 21$ мм. Крутящий момент, создаваемый одним проводником $M_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} R_{\text{ср}} = 15.1 \cdot 10^{-3} \cdot 21 \cdot 10^{-3} = 0.317 \cdot 10^{-3}$ Нм. Так как общее число активных проводников на двух сторонах шайбы статора равно $2n = 120$, суммарный крутящий момент электродвигателя достигает значения $M = M_{\text{пр}} \cdot 2n = 0.317 \cdot 10^{-3} \cdot 120 = 0.038$ Нм.

Полученная величина суммарного крутящего момента является достаточной для решения задач позиционирования небольших оптических устройств, следовательно предложенный вентильный двигатель может быть использован в системах автоматики в качестве исполнительного элемента.

Заключение

Рассматриваемая конструкция вентильного электродвигателя с печатной обмоткой статора отличается, главным образом, применением обмотки разомкнутого типа со двоянными секциями. Такая обмотка не уступает волновой по достижимому числу активных проводников, не сложнее ее технологически, но позволяет упростить схему и увеличить надежность работы электронного коммутатора. Она особенно удобна для двигателя, работающего при низких значениях напряжения питания, и может быть рекомендована для использования в конструкциях подобных вентильных электродвигателей.

Список литературы

1. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979. 270 с.*
2. Овчинников И.Е., Егоров А.В. Математическая модель вентильного двигателя поворотной платформы телескопа // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 91-98.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
4. Acarnley P.P., Watson J.F. Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent-Magnet Machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. Vol. 53, no.2. P. 352-362. DOI: [10.1109/TIE.2006.870868](https://doi.org/10.1109/TIE.2006.870868)
5. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1975. 28 с.
6. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1985. 255 с.
7. Кенно Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1989. 180 с.
8. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1989. 224 с.
9. Высоцкий В.Е. Математические модели вентильных магнитоэлектрических двигателей в системе дискретно-ориентированных координат // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2005. Вып. 32. С. 130-144.
10. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. М.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 148 с.

Brushless DC Motor with a Printed Coil Open Type

A.V. Sitnikov^{1,*}, E.N. Baranov¹

* sit_irina@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: brushless DC motor, rotor, stator, printed coil open type, the number of pairs of poles, the Hall sensor, the sensor of angular position of the rotor, electromechanical torque

The electric motors, which must have small dimensions, linear control response, and high performance are used as the Executive elements of modern automatic control systems. Besides, the motors often have to meet also additional requirements for using a low voltage power supply and minimal uneven rotor rotation.

The authors analyze in the article the advantages and disadvantages of existing brushless DC motors and a permanent magnet synchronous motor used in control systems optoelectronic devices. On the analysis basis, the authors propose a design of a brushless DC motor with the printed winding of an open type, having a reduced level of electromagnetic torque ripple, small size, and operating at reduced supply voltage, allowing its using as a part of the mobile electro-mechanical devices.

The stator of the motor comprises a non-magnetic disc with printed phase windings on it thereby allowing significant reduction of the motor size. At the rotor, there are twelve evenly spaced permanent magnets secured in accordance with the selected number of pole pair, which form the excitation system. The number of pairs of poles, at least six, can provide the unevenness of the rotor rotation being no more than 0.01% of the nominal speed. A feedback system uses the Hall-effect position sensors of the rotor secured on the stator.

The article discusses design of electromagnetic motor system, proposes design of the stator printed windings of an open type, and calculates the torque value of the motor. The offered motor design meets requirements for the Executive elements of modern control systems and can find application in precision automation systems.

References

1. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979. 270 с.*

2. Овчинников И.Е., Егоров А.В. Математическая модель вентильного двигателя поворотной платформы телескопа // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 91-98.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
4. Acarnley P.P., Watson J.F. Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent-Magnet Machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. Vol. 53, no.2. P. 352-362. DOI: [10.1109/TIE.2006.870868](https://doi.org/10.1109/TIE.2006.870868)
5. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1975. 28 с.
6. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1985. 255 с.
7. Кенно Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1989. 180 с.
8. Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1989. 224 с.
9. Высоцкий В.Е. Математические модели вентильных магнитоэлектрических двигателей в системе дискретно-ориентированных координат // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2005. Вып. 32. С. 130-144.
10. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. М.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 148 с.