

УДК 621.311

**ТОПОЛОГИИ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ОБМОТОК ПЕЧАТНЫХ
СТАТОРОВ АКСИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**
**TOPOLOGIES OF LUMINATE WINDINGS OF PRINTED STATORS
OF AXIAL VALVE ELECTRIC MOTORS**

М. А. Мойсееня, А. А. Радкевич

Научный руководитель – Т. Е. Жуковская, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

М. Maiseyenia, A. Radkevich

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** рассмотрен вопрос проектирования конструкций обмоток статоров, изготовленных на печатных платах с медными обмотками, для вентильных электродвигателей с аксиальным магнитным потоком. В системе автоматизированного проектирования (САПР) Altium Designer созданы прототипы печатных статоров различных конфигураций концентрических обмоток: круговой и трапецевидной. Описан процесс создания печатных статоров в Altium Designer. Проанализированы преимущества и недостатки каждой из рассмотренных топологий печатных статоров. Полученные модели печатных статоров являются основой для изготовления физических образцов печатных статоров аксиальных электродвигателей.*

***Abstract:** the article deals with the issue of PCB stator with copper windings design for AC electric motors with axial magnetic flux. In the software CAD system Altium Designer prototypes of various PCB concentric stators winding configurations were created: circular and trapezoidal. The methodology and process of layer-by-layer creation of PCB stators in Altium Designer were described. The advantages and disadvantages of each of the considered topologies of PCB stators were analyzed. The obtained models of PCB stators are the basis for producing of PCB stators physical samples of an axial electric motors.*

***Ключевые слова:** сосредоточенные обмотки, печатный статор, обмотка статора, синхронный электродвигатель, вентильный электродвигатель, аксиальный электродвигатель, Altium Designer.*

***Keywords:** concentrated windings, PCB stator, stator winding, synchronous electric motor, AC electric motor, axial-flux motor, Altium Designer.*

Введение

В последнее десятилетие получила развитие новая технология производства синхронных электродвигателей со статорами на печатной плате с аксиальным магнитным потоком. Аксиальная конструкция синхронных двигателей с постоянными магнитами на роторе (AFPM) компактна и легка по сравнению с двигателями с радиальным магнитным потоком. Поэтому

она подходит для применения в условиях, требующих высокой частоты вращения. Отсутствие стального сердечника статора минимизирует высокочастотные потери мощности в стали, и, следовательно, повышает коэффициент полезного действия двигателя. Кроме того, конструкция аксиального двигателя с печатным статором повышает удельную мощность двигателя. Исходя из этого, такие двигатели нашли применение в тех областях промышленности, где требуются минимальные габариты и высокое быстродействие: в устройствах автоматизации, бытовой электронике, медицинской технике и т. п. [1]

Вместе с тем, вопросы проектирования двигателей с печатными статорами еще не до конца исследованы. Поскольку на формирование требуемого вращающегося магнитного поля статора влияют ряд факторов, среди которых конфигурация обмоток платы, толщина и ширина дорожек, число слоев платы, ширина воздушного зазора, топологии постоянных магнитов роторов и т. д., вопрос выбора оптимальной топологии печатного статора является актуальным для изучения.

Исходя из этого, целью данной работы является анализ различных конструкций и топологий обмоток печатных плат статоров вентильных электродвигателей с аксиальным магнитным потоком на основе проектирования цифровых двойников печатных статоров в программном пакете *Altium Designer*. Поставленная цель определила следующие задачи исследования:

- анализ существующих обмоток печатных статоров, их классификация;
- разработка методики проектирования и создания цифровых прототипов печатных статоров в САПР *Altium Designer*;
- анализ полученных результатов проектирования печатных плат, определение достоинств и недостатков каждой конфигурации, рекомендации по выбору наиболее оптимальной топологии печатного статора.

Основная часть

Ключевым аспектом проектирования конструкции печатного статора аксиального двигателя является тип используемой обмотки. В печатных статорах получили распространение обмотки сосредоточенного и распределенного типа. Как сосредоточенные, так и распределенные обмотки имеют ряд преимуществ и недостатков.

Так авторы спроектировали и оптимизировали сосредоточенные обмотки печатной платы, уменьшив площадь платы, но обмотки по-прежнему занимали большую площадь [2]. В работе [3] показано, что обмотки печатных плат волновой формы имеют более высокий КПД и меньшие потери, чем круговые обмотки печатных плат. Новая обмотка печатной платы объединила преимущества трапецевидной и круговой обмоток, и, с увеличенной против-ЭДС и мощностью, имеет более высокий КПД, чем трапецевидные, круговые и ромбические обмотки [3].

Таким образом, можно видеть, что исследования статорных обмоток в основном касаются формы и оптимизации неперекрывающихся сосредоточенных обмоток (ромбовидных, волновых, трапецевидных и круговых).

Распределенные обмотки, топологии их соединений и коэффициент использования обмоток статора мало изучены.

В ходе выполнения исследования в среде проектирования печатных плат *Altium Designer* были созданы прототипы печатных статоров двух конфигураций сосредоточенных обмоток: круговой и трапецевидной.

Методика создания печатных плат основывалась на конструировании обмоток исходя из заданных геометрических параметров, номинальной частоты вращения, номинального тока, мощности, КПД двигателя.

Результат создания печатного статора с обмотками сосредоточенного кругового типа отображен на рис. 1.

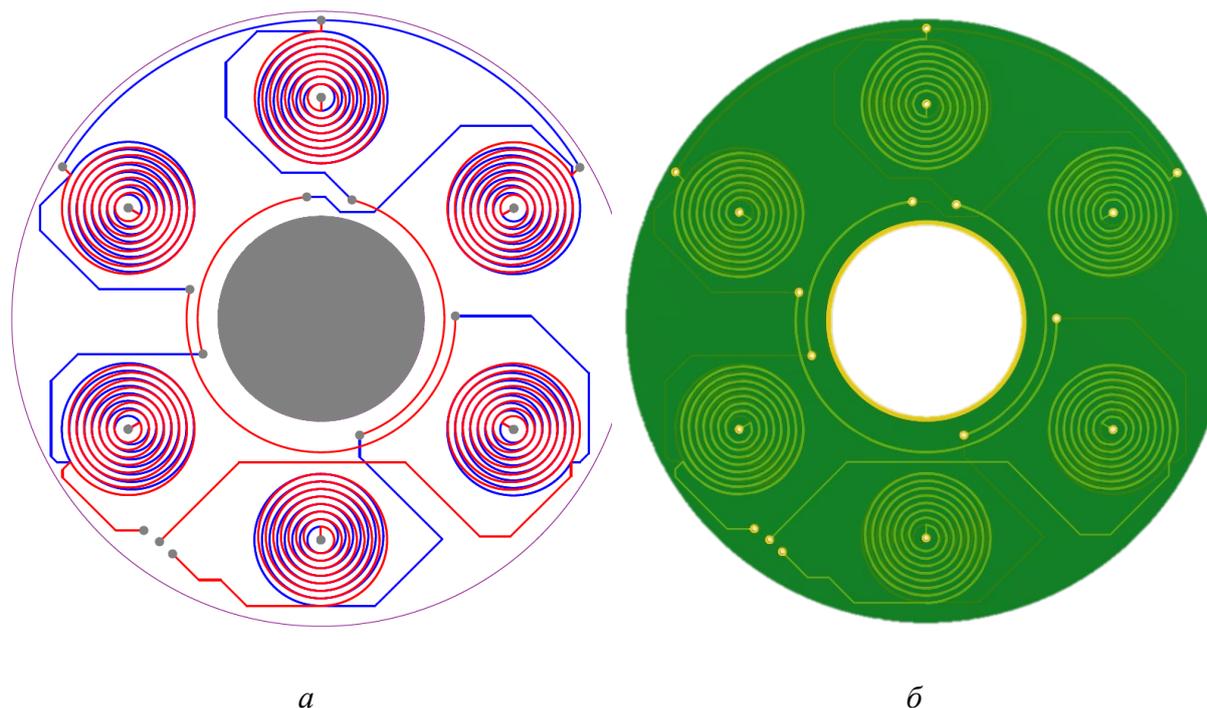


Рисунок 1 – Модель печатного статора с обмотками кругового сосредоточенного типа в Altium Designer: *а* – 2D схема разводки; *б* – 3D прототип

Печатная плата, изображенная на рис. 1, является двухслойной, благодаря этому она становится дешевле, но исходя из этого достигается меньший магнитный поток и мощность двигателя.

Технические характеристики печатного статора, спроектированного в соответствии с рис. 1, указаны в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики печатного статора с круговыми обмотками

Наименование параметра	Значение
Число катушек	6
Расстояние между дорожками катушки, мм	1
Ширина дорожки катушки, мм	0,25
Число слоев платы	2
Максимальный ток катушек, А	2
Номинальная мощность катушек, Вт	80
Номинальный КПД катушки, %	85

Сосредоточенная обмотка, как показано на рис. 1, состоит из концентрических катушек. Каждая фаза обмотки соединена последовательно посредством нескольких катушек. Поскольку катушки являются круговыми с фиксированным расстоянием между дорожками, коэффициент шага обмотки постоянный.

Преимущества сосредоточенных обмоток по сравнению с распределенными заключаются в более короткой длине проводников и более простой конструкции. Некоторые исследования показали, что сосредоточенные катушки имеют оптимальные коэффициенты обмоток и снижают потери в меди, особенно в конструкциях двигателей с большим числом полюсов. Сосредоточенные обмотки подходят для осевых вентильных двигателей как по причине высокой эффективности, так и по причине простоты изготовления [2–3].

На рис. 2 представлен другой тип сосредоточенной обмотки с трапециевидными катушками, созданный в *Altium Designer*.

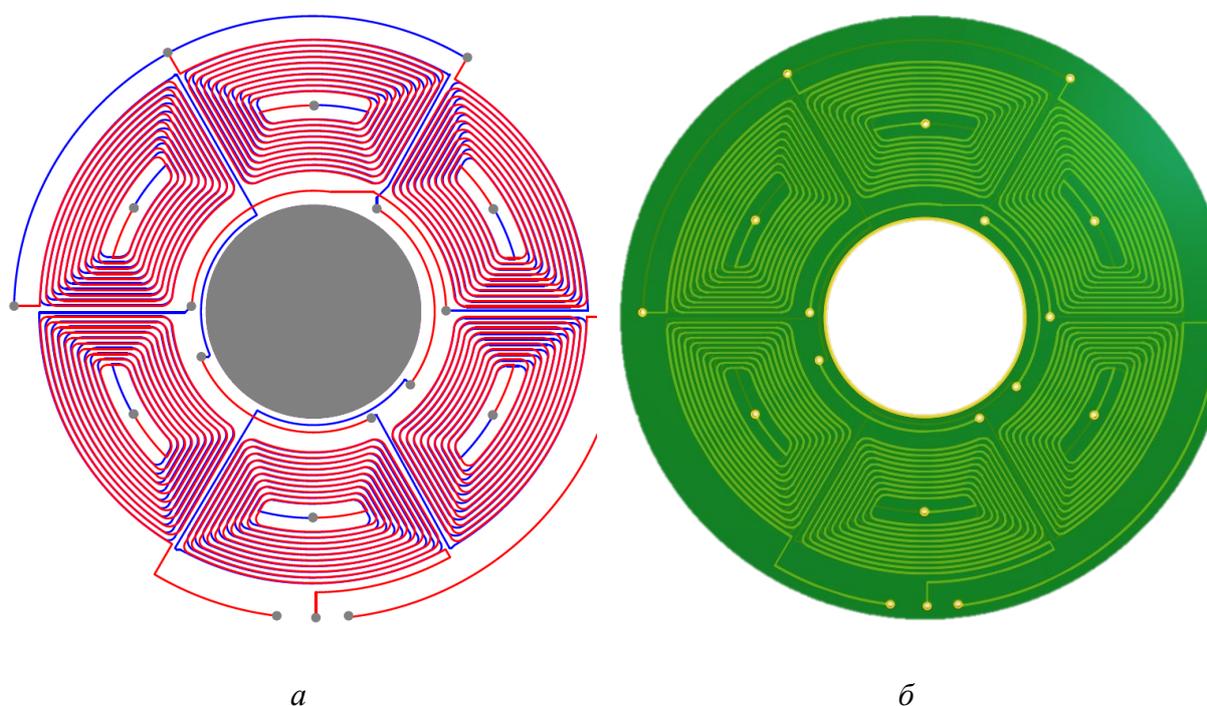


Рисунок 2 – Модель печатного статора с обмотками трапецеидального сосредоточенного типа в *Altium Designer*: *а* – 2D схема разводки; *б* – 3D прототип

Технические характеристики печатного статора с сосредоточенными трапециевидными обмотками согласно рис. 2 указаны в табл. 2.

Плата печатного статора с трапециевидными катушками, показанная на рис. 2, также является двухслойной, а ее эффективность зависит от площади поперечного сечения медных дорожек. Трапециевидная сосредоточенная обмотка является более распространенной по сравнению с круговой, а также имеет ряд отличий. Импеданс падения напряжения в этой обмотке будет больше, чем противо-ЭДС, что не только влияет на увеличение удельной

мощности, но при этом увеличивает и сопротивление обмотки. Эта обмотка также характеризуется большим потреблением меди [2].

Таблица 2 – Характеристики печатного статора с трапециевидными обмотками

Наименование параметра	Значение
Число катушек	6
Расстояние между дорожками катушки, мм	1
Ширина дорожки катушки, мм	0,25
Число слоев платы	2
Противо-ЭДС катушек, В	12,66
Номинальная мощность катушек, Вт	80,87
Номинальное сопротивление катушек, Ом	3,02
Номинальный электромагнитный момент катушек, Н·м	0,121
Потери напряжения в меди, В	12,08
Номинальный КПД катушек, %	85,06

Уменьшение высоты или ширины дорожки увеличивает потери в меди постоянного тока из-за более низкой допустимой нагрузки по току, если количество дорожек неизменно. Минимальная ширина медной дорожки ограничена точностью оборудования, используемого для производства платы. Коэффициент заполнения печатных плат ограничен свойствами изоляционного материала между медными дорожками, при этом напряжении утечки угрожает целостности печатной платы, если создаются зазоры ниже минимума, определенного в действующих стандартах для печатных плат производство. Для двигателей с печатными статорами, работающими на низких частотах порядка 25 Гц, ширина медной дорожки составляет 1,2 мм. В АФРМ двигателя, рассчитанном на работу на частоте 1 кГц, ширина медной дорожки 0,3 мм, с расстоянием 0,3 мм между дорожками [3]. Общий стандарт проектирования печатных плат IPC-2221. рекомендует иметь минимальное расстояние 0,13 мм между дорожками при минимальной ширине дорожки 0,15 мм [3].

Заключение

В ходе проведенного исследования двух видов сосредоточенных обмоток были получены параметрические 2D и 3D модели двухслойных печатных плат статора для вентильного двигателя, включающие круговую и трапецеидальную обмотки, содержащие 6 катушек. Конструкция обмоток статора оказывает непосредственное влияние на производительность двигателя, что характеризуется коэффициентом использования статора. Результаты аналитических и экспериментальных исследований показывают, что тип статора с сосредоточенными катушками и постоянным шагом обмоток превосходит все другие типы обмоток, включая распределенные. Из рассмотренных вариантов преимуществом обладает трапециевидная обмотка с шагом катушки 240 электрических градусов за счет улучшенного коэффициента заполнения обмотки.

Литература

1. Xia, B. Comparative study of air-cored axial-flux permanent-magnet machines with different stator winding configurations / B. Xia, J. X. Shen, P. C. K. Luk, W. Fei. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Т. 62, №. 2. – P. 846–856.
2. Kesgin, M. G. Design optimization of coreless axial-flux PM machines with Litz wire and PCB stator windings. / M. G. Kesgin, P. Han, N. Taran, D. Lawhorn, D. Lewis, D. M. Ionel. // 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – IEEE, 2020. – P. 22–26.
3. Wang, X. Winding design and analysis for a disc-type permanent-magnet synchronous motor with a PCB stator. / X. Wang, H. Lu, X. Li. // Energies. – 2018. – Т. 11, №. 12. – P. 3383.