

**ТЕМПЕРАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТУШЕК ОБМОТОК
ПЕЧАТНОГО СТАТОРА ВЕНТИЛЬНОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

А. П. БУЙВИД, А. А. РАДКЕВИЧ, М. А. МОЙСЕЕНЯ
(Белорусский национальный технический университет, г. Минск)

Аннотация. *Проведено температурное исследование поведения статора синхронного электродвигателя, выполненного на печатной плате с медными обмотками, состоящими из концентрических катушек. В системном пакете автоматизированного проектирования SolidWorks построен цифровой прототип печатного статора синхронного двигателя и проведено моделирование его нагрева МКЭ-методом. В результате были выявлены закономерности по равномерному нагреву катушек обмотки с понижением температуры нагрева ближе к краю печатной платы.*

Ключевые слова: *синхронный электродвигатель, вентильный электродвигатель, печатный статор, обмотка статора, температурный анализ, параметрическое моделирование, метод конечных элементов, SolidWorks.*

Введение. В последнее десятилетие получила развитие новая технология производства синхронных электродвигателей со статорами на печатной плате с аксиальным магнитным потоком. Этот тип двигателей имеет преимущества перед другими электродвигателями с осевым потоком по условиям изготовления, конструкции и эксплуатации.

Электродвигатели с постоянными магнитами с осевым магнитным потоком (AFPM) со статором без сердечника считаются высокоэффективными машинами из-за отсутствия потерь в сердечнике и потенциально могут работать с более высоким КПД, чем традиционные электродвигатели. Помимо достоинств, связанных с применением постоянных магнитов с осевым магнитным потоком, AFPM электродвигатели имеют ряд других преимуществ, таких как высокое соотношение крутящего момента к массе, более высокая удельная мощность, более высокий КПД и более компактная структура [2]. Эти свойства вентильных двигателей с печатным статором определили их распространение в ветроэнергетических установках, мотор-колёсах электромобилей, гибридных транспортных средствах и робототехнике.

Поскольку обмотки статора располагаются на печатной плате, они могут быть масштабированы и произведены в массовом порядке на предприятиях микроэлектроники. Кроме того, в печатном статоре обеспечивается высокая точность слоёв в микрометровом диапазоне, поэтому каждый слой идентичен с точки зрения электрических свойств, изоляции и качества сборки.

Одна из основных проблем применения статора на печатной плате заключается в высоком магнитном сопротивлении, поскольку статор не имеет сердечника, что приводит к низкой фазовой индуктивности. Такая особенность может быть полезна в системах управления, требующих высокого быстродействия, однако с учётом малой электрической постоянной времени, это также приводит к высоким пульсациям тока при относительно низких частотах переключения. Решение этой проблемы сводится к включению последовательно к каждой фазе двигателя индуктора [1]. Однако дополнительный индуктор снижает как удельную мощность двигателя, так и его КПД.

Тематика проектирования и создания печатных статоров, обладающих высокими магнитными и электрическими свойствами и свободных от описанных выше недостатков, является актуальной проблемой для исследователей во всём мире. Исследуются различные варианты компоновки узлов двигателей. Структура «внешний ротор – внутренний статор», также называемая TORUS, является наиболее широко используемой топологией двигателей с осевым магнитным потоком. Она обладает такими преимуществами, как простая конструкция, низкая стоимость, низкий уровень шума и плавный крутящий момент [3]. Структура с двойным внешним ротором и одним статором для машин AFPM с воздушным сердечником менее распространена ввиду низкой индуктивности обмоток. Сравнительный анализ эффективности этих структур представлен в статье [3].

В зависимости от прохождения магнитного потока сквозь обмотки статора различают несколько топологий катушек печатных статоров, из которых наиболее эффективной и распространённой является концентрическая обмотка. Исследование двух типов концентрических обмоток статора методом конечных элементов рассматривается в работе [4]. Ряд статей [5–7] посвящён проектированию и анализу конструкций статоров без сердечника с различными видами прохождения магнитного потока. На основе анализа распределения магнитных полей в обмотках статора делается вывод о дальнейшей оптимизации конструкции двигателя.

Целью данной работы является анализ и оценка термического воздействия на концентрические медные обмотки печатного статора синхронного двигателя с аксиальным магнитным потоком методом конечных элементов с применением системы автоматизированного проектирования SolidWorks и созданного в ней пространственного прототипа печатного статора.

Построение пространственного прототипа печатного статора. Существует два типа концентрированных катушек печатного статора. Поскольку распределение магнитного потока, создаваемое катушкой в машинах с воздушным сердечником, отличается от распределения потока в двигателях с сердечником, определение коэффициента катушки также отличается.

Угловая площадь, занимаемая одной катушкой, определяется как шаг катушки θ_p (в электрических радианах), а электрические радианы между средними

линиями полосы катушки равны Θ_M . В одном случае топологии концентрических катушек соседние витки плотно касаются друг друга по краю витков. Для другого типа соседние витки касаются друг друга только по внутреннему радиусу R_i . Для сердечников с прорезями коэффициент катушки в основном определяется шагом катушки. Когда шаг катушки составляет 180 электрических градусов, поточесцепление через катушку максимальное и, таким образом, достигается максимальная ЭДС.

Коэффициент, представляющий уменьшение, называется коэффициентом шага. Также в двигателях с воздушным сердечником нельзя игнорировать ширину слоя катушки, поскольку проводники в каждой катушке имеют разность фаз по отношению друг к другу. Таким образом, происходит уменьшение суммы векторов ЭДС, поскольку проводники в одном слое катушки не находятся в фазе. Коэффициент $K_B(r)$, указывающий на снижение напряжения проводника из-за изменения ширины слоя катушки, называется коэффициентом полосы и определяется по формуле (1):

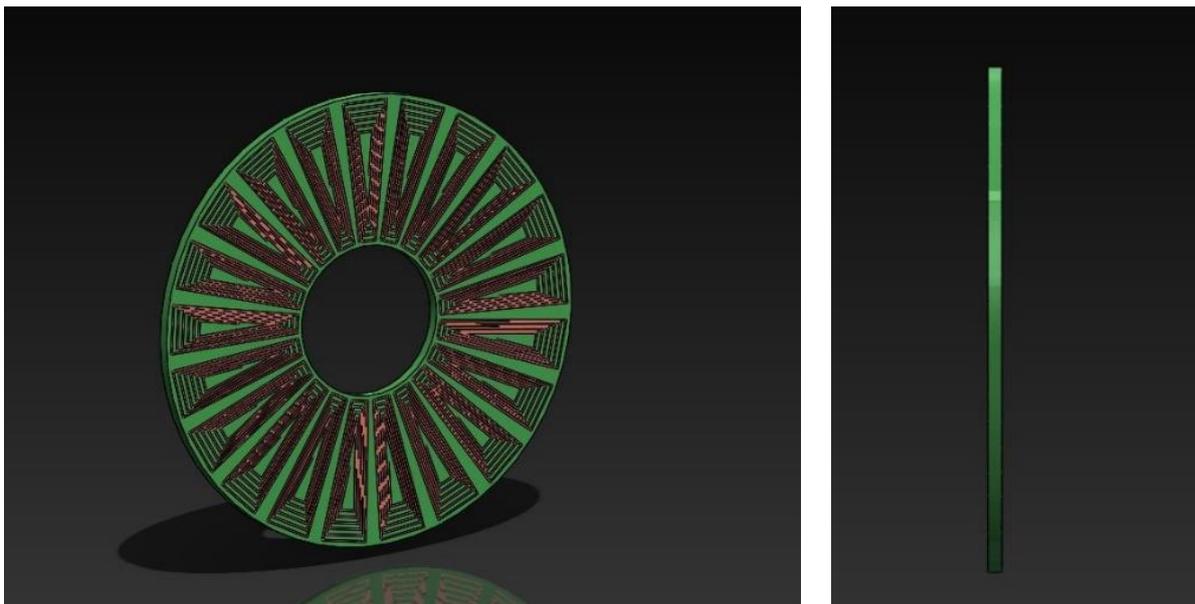
$$K_B(r) = \frac{2 \int_0^{W_C/2} B \cdot \Delta r \cdot \Omega \cdot r \cdot \cos\left(\frac{x_i}{\tau_p} \cdot \pi\right) \cdot dx_i}{B \cdot \Delta r \cdot \Omega \cdot r \cdot W_C} = \frac{2 \cdot \tau_p}{\pi \cdot W_C} \cdot \sin\left(\frac{W_C}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (1)$$

Поскольку одна дорожка принимается как идеальный проводник, коэффициент изменения тангажа на определенном радиусе $K_p(r)$ можно рассчитать по формуле (2):

$$K_p(r) = \sin\left(\frac{\Theta_M}{2}\right), \quad (2)$$

где Θ_M – электрический угол между средними линиями дорожки катушки, рад.

В программном пакете SolidWorks построим цифровую модель однослойного печатного статора для синхронного двигателя с аксиальным магнитным потоком (AFPM), имеющего в своей конструкции один печатный статор и два ротора с постоянными магнитами, расположенные по обе стороны от него. Статор с воздушным сердечником имеет 20 концентрических медных катушек (полюсов), содержащих 6 параллельных проводников в каждой катушке. При моделировании зададимся радиусом платы: $r = 0,07$ м, толщина слоя $s = 0,005$ м, толщина проводника катушки $t = 18 \cdot 10^{-6}$ м, ширина дорожки $a = 1 \cdot 10^{-4}$ м, расстояние между проводниками одной катушки $\Delta r = 0,003$ м. Пространственная модель данного печатного статора показана на рисунке 1 а, б.



а

б

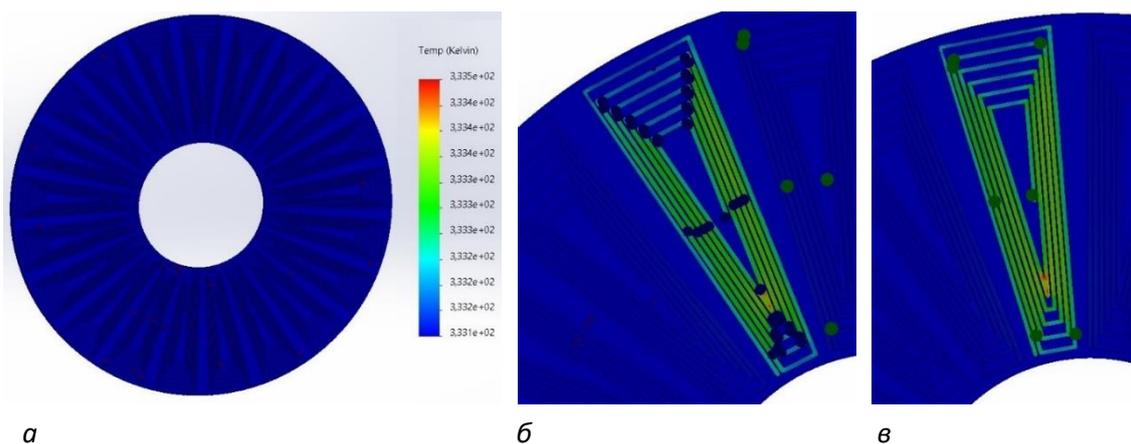
а – аксонометрическая модель; *б* – вид сбоку

Рисунок 1. – Параметрическая цифровая модель печатного статора

При проведении термического анализа статора предположим, что вихревые потери зависят от ширины трассировки. Оптимизация дорожки статора постоянной ширины выбирается путем сравнения потери проводимости с потерями на вихревые токи на обмотки статора. Поскольку ширина дорожки увеличивается, вихревые потери становятся значительными. Если ширина проводника уменьшается, потери проводимости будут увеличиваться по мере увеличения поперечного сечения и уменьшения площади.

Результаты теплового моделирования печатного статора при различных значениях температуры представлены на рисунке 2, *а – в*.

Анализ результатов термического моделирования печатного статора показали наличие нагрева проводников катушек при увеличении температуры. С ростом температуры на 10 °С по сравнению с комнатной (40 °С) наблюдается нагрев до 50 °С дорожек медных обмоток постоянной ширины, расположенных параллельно в продольном направлении и меньший нагрев (до 46 °С) дорожек, расположенных в поперечном направлении у краёв платы на большем расстоянии между дорожками. При увеличении температуры до 60 °С температура проводников сохраняется прежней, однако повышение температуры до 75 °С теперь наблюдается в месте соприкосновения дорожек двух продольных направлений, где проводники образуют острый угол. В данном месте при длительном перегреве возможно разрушение изоляционных частей платы статора.



а – нагрев платы при $t = 40\text{ °C}$; **б** – нагрев катушки статора при $t = 50\text{ °C}$;
в – нагрев катушки статора при $t = 60\text{ °C}$

Рисунок 2. – Термический анализ печатного статора

Таким образом, анализ термического моделирования показал, что печатный статор с концентрическими катушками постоянной ширины 0,3 мм характеризуется перегревом проводников в месте их контакта. Аналитические результаты показали, что обмотки разной ширины лучше подходят для длительной работы двигателя, поскольку вихревые токи не является доминирующим в этом диапазоне. Для более высокой частоты вращения ширина дорожек должна быть уменьшена, чтобы ограничить потери на вихревые токи. Результаты показали, что температура платы статора достигала 46 °C при номинальной нагрузке с использованием естественной конвекции, а максимальное значение температуры проводника равнялось 75 °C при тех же условиях.

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. – С. 846–856.
2. Taran N. Coreless and conventional axial flux permanent magnet motors for solar cars. / N. Taran, V. Rallabandi, G. Heins, D. M. Ionel // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2018. – Т. 54. – №. 6. – С. 5907–5917.
3. Mignot R. B. Design of an axial flux PM motor using magnetic and thermal equivalent network / R. B. Mignot, R. Glises, C. Espanet, E. Saint Ellier, F. Dubas, D. Chamagne // The European Physical Journal-Applied Physics. – 2013. – Т. 63. – №. 3. – С. 30901.
4. Paiva R. D. Magnetic topology with axial flux concentration: a technique to improve permanent-magnet motor performance / R. D. Paiva, V. C. Silva, S. I. Nabeta, I. E. Chabu // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2017. – Т. 16. – С. 881–899.
5. Talebi D. Electromagnetic design characterization of a dual rotor axial flux motor for electric aircraft / D. Talebi, M. C. Gardner, S. V. Sankarraman, A. Daniar, H. A. Toliyat // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2022. – Т. 58. – №. 6. – С. 7088–7098.
6. 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. – С. 3383.