

В. В. ГРЕБЕНИКОВ, Р. В. ГАМАЛЕЯ, В. С. ПОПКОВ, А. Н. СОКОЛОВСКИЙ, **Н. В. БОГАЕНКО****ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА С ДВУХСТОРОННИМ СТАТОРОМ, ОСЕВЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ, ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И МНОГОСЛОЙНЫМИ ПЕЧАТНЫМИ ОБМОТКАМИ**

Застосування друкованих обмоток в електричних машинах з постійними магнітами і осевим магнітним потоком дозволяє зменшити їх осевий розмір і суттєво збільшити щільність струму в обмотках через малу товщину і відповідно велику ширину провідників друкованих обмоток і як наслідок кращого їх охолодження. Виготовлено дослідний зразок електричної машини з двостороннім статором, багатопровідними друкованими обмотками і постійними магнітами циліндричної форми. Визначені залежності напруги і потужності в генераторному режимі при підключенні обмоток через діодний міст до навантаження. Розрахункова модель генератора адекватно описує фізичну модель. Розбіжність між розрахунковими і експериментальними значеннями не перевищує $\varepsilon = 4\%$. Розрахунок характеристик досліджуваних генераторів виконувався в пакетах програм Simcenter MagNet і Simcenter MotorSolve.

Ключові слова: постійні магніти, друковані обмотки, електромагнітний момент, зовнішні характеристики, експериментальний зразок.

Применение печатных обмоток в электрических машинах с постоянными магнитами и осевым магнитным потоком позволяет уменьшить их осевой размер и существенно увеличить плотность тока в обмотках из-за малой толщины и соответственно большой ширины проводников печатной обмотки и как следствие лучшего их охлаждения. Изготовлен опытный образец электрической машины с двухсторонним статором, многослойными печатными обмотками и постоянными магнитами цилиндрической формы. Определены зависимости напряжения и мощности в генераторном режиме при подключении обмоток через диодный мост к нагрузке. Расчетная модель генератора адекватно описывает физическую модель. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает $\varepsilon = 4\%$. Расчет характеристик исследуемых генераторов выполнялся в пакетах программ Simcenter MagNet и Simcenter MotorSolve.

Ключевые слова: постоянные магниты, печатные обмотки, электромагнитный момент, внешние характеристики, экспериментальный образец.

The use of printed windings in electric machines with permanent magnets and axial magnetic flux allows to reduce their axial size and significantly increase the current density in the windings due to the small thickness and correspondingly large width of the conductors of the printed winding and, as a result, their better cooling. The dependences of voltage and power in the generator mode are determined when connecting the windings through the diode bridge to the load. Investigations of the effect of stator teeth on the magnitude of the electromagnetic torque are made. It was found that the presence of teeth on the stator allows you to increase the electromagnetic torque of the electric machine by about 26% compared with the version of the magnetic system without teeth. The effect of the displacement of one stator relative to another on the magnitude of the tooth torque has been studied. A prototype of an electric machine with a double-sided stator, multilayer printed windings and permanent cylindrical magnets was manufactured. The calculated model of the generator adequately describes the physical model. The discrepancy between the calculated and experimental values does not exceed $\varepsilon = 4\%$. The characteristics of the studied generators were calculated by the software packages Simcenter MagNet and Simcenter MotorSolve.

Keywords: permanent magnets, printed windings, electromagnetic torque, external characteristics, experimental sample.

Введение. Электродвигатели с печатными обмотками в промышленности использовались довольно давно. Наибольшее распространение получили две конструкции таких двигателей: с полым цилиндрическим ротором и дисковым якорем [1]. Такого типа электродвигатели предназначены в основном для производственных механизмов, где необходимо быстрое изменение значения или направления скорости движения рабочих органов, т.е. требуются значительное ускорение или замедление вращения вала. Для обеспечения высокого быстродействия проводники наносятся на обе стороны поверхности якоря специальным фотохимическим способом, откуда и произошло название печатной обмотки.

Серия двигателей с цилиндрической печатной обмоткой типа ДПР имеет внешний диаметр в пределах 15-40 мм, а их длина не превышает 84 мм, мощность в пределах 2-10 Вт. Серия ДПЦЯ с постоянными магнитами имеет мощность 370-620 Вт. В этих двигателях концы обмотки подводятся к коллектору, как и в обычной конструкции двигателя постоянного тока. [2].

Другой тип конструкции состоит из печатных обмоток, которые закреплены в статоре, а ротор состоит из постоянных магнитов, закрепленных в специальной обойме. Статор с печатной обмоткой упростил конструкцию электрической машины и позволил су-

щественно уменьшить осевую длину. Другое положительное свойство – это малая толщина и соответственно большая ширина проводников обмотки, поэтому охлаждение таких проводников значительно лучше. Эти факторы позволяют повысить величину тока в проводниках и снизить габариты и массу электрической машины.

В настоящее время интенсивно разрабатываются электрические машины с печатными обмотками и аксиальным магнитным потоком (дискового типа) для различных применений. Например, в [3] приведены результаты исследования электродвигателя с осевым магнитным потоком и печатной обмоткой мощностью 400 Вт. В данной статье исследуется влияние формы печатной обмотки на характеристики электродвигателя. Оптимизации геометрии печатной обмотки электродвигателя с осевым магнитным потоком и постоянными магнитами посвящена статья [4], в которой показано, что соотношение крутящего момента и потерь в меди увеличивается на 30 % за счет оптимизации геометрии печатных обмоток. В [5] предлагается оригинальная компоновка двигателя с осевым магнитным потоком, постоянными магнитами и волновой печатной обмоткой, располагаемой с двух сторон печатной платы. Экспериментальные исследования такого двигателя продемонстрировали его преимуще-

ства по сравнению с традиционным. В [6] исследуется электродвигатель, состоящий из внутреннего ротора с постоянными магнитами и двухстороннего статора с печатными обмотками, который предназначен для маломощного вихревого насоса.

Перечисленные выше электродвигатели применяются для исполнительных устройств и имеют, как правило, небольшую мощность. Однако в промышленности находят применение технологии печатных обмоток для электродвигателей и генераторов с постоянными магнитами большой мощности. Одной из таких уже апробированных технологий является технология, разработанная фирмой ThinGap, в основу которой положена специальная структура цилиндрических печатных обмоток [7].

Такая технология благодаря высокому использованию рабочего объема, в котором происходит процесс электрохимического преобразования энергии, является привлекательной альтернативой традиционным машинам цилиндрической конфигурации. Обмотки двигателей фирмы ThinGap изготавливаются с прецизионной машинной точностью и благодаря этому и малой величине зазора такие машины имеют большие удельные моменты и мощности (на единицу массы) по сравнению с традиционными машинами. Например, электродвигатель типа LSI-267-32 имеет следующие параметры: мощность – 2,06 кВт; электромагнитный момент – 11,5 Нм; пиковый момент (в течение 3 с) – 36,8 Нм; частота вращения вала – 2200 об/мин; КПД – 90%; масса двигателя – 2,047 кг.

Таким образом, применение печатных обмоток для электродвигателей представляется весьма перспективным. Электродвигатели с печатными обмотками и аксиальным магнитным потоком, как правило, разрабатываются для приложений, где необходимы малый момент и мощность. Для мощности несколько киловатт такого типа двигатели практически не исследованы, поэтому данная статья посвящена исследованию электрической машины с печатными обмотками мощностью до 8 кВт, которые могут быть использованы, например, для электровелосипедов и электромоторчиков или в качестве генераторов для ветро- и гидроустановок небольшой мощности.

Постановка задачи. Целью работы является исследование электрической машины с осевым магнитным потоком, двухсторонним статором, постоянными магнитами в роторе и многослойными печатными обмотками при вариации геометрии магнитной системы статора, а также сравнение расчетных и экспериментальных характеристик, полученных при испытаниях опытного образца электрической машины.

Объект исследования. На рис.1 представлен общий вид магнитной системы исследуемой электрической машины. Статор 1 охватывает ротор с двух сторон и состоит из двух симметрично расположенных частей. Каждая часть содержит магнитопровод из шихтованной электротехнической стали и закрепленную на нем многослойную печатную обмотку. Печатная обмотка 2 имеет 18 катушек (по 6 катушек на фазу). Ротор состоит из двадцати цилиндрических постоянных магнитов 3, закрепленных на немагнитном основании, которое на рис. 1 не показано. Магнито-

провод статора имеет зубцы 4, высота которых равна $h_3 = 3,3$ мм и соответствует толщине печатной обмотки. Размеры поперечного сечения зубцов таковы, что постоянные магниты диаметром $D_{pm} = 25$ мм полностью их перекрывают. Для того чтобы были видны зубцы статора на рис.1 две катушки и один постоянный магнит ротора не показаны. Основные параметры исследуемой электрической машины приведены в табл. 1.

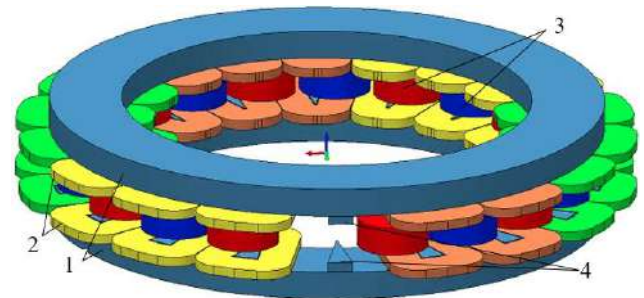


Рис. 1 – Общий вид магнитной системы исследуемой электрической машины

Исследование печатной обмотки на нагрев.

Применение печатной обмоткой позволяет существенно упростить конструкцию, повысить технологичность изготовления и уменьшить осевую длину электрической машины. Еще одним положительным качеством печатных обмоток является возможность работы при более высоких плотностях тока по сравнению с традиционной обмоткой за счет более эффективного отвода тепла с поверхности печатной обмотки. Известно, что плотность тока в печатной обмотке может достигать $30\div40$ А/мм² [8]. Поэтому на первом этапе были проведены экспериментальные исследования многослойных печатных обмоток на нагрев и определена номинальная плотность тока, при которой печатная обмотка нагревается до температуры не более 80°.

Для этого были изготовлены образцы катушек печатных обмоток, один из которых показан на рис. 2. Каждая катушка состоит из 18 слоев меди толщиной 0,05 мм. Между четными слоями меди располагается изоляционный слой «core», толщина которого равна – 0,13 мм, между нечетными слоями меди находится изоляционный слой «preg», толщина которого равна – 0,062 мм.

Испытания на нагрев проводились следующим образом. Испытуемые катушки закреплялись на статоре электрической машины, и подключалась к источнику тока, задавалось определенное значение тока, и через заданный промежуток времени измерялась температура на поверхности катушки. Все испытания проводились с обдувом катушек небольшим вентилятором, имитирующим принудительное охлаждение обмоток исследуемой электрической машины. Обдув печатных обмоток в экспериментальном образце электрической машины был реализован с помощью крыльчатки, установленной на роторе.

Были проведены испытания на нагрев одной катушки (количество слоев печатных обмоток равно $k_{cl} = 1$) и двух (количество слоев – $k_{cl} = 2$). В этом случае слои разделенных тонким слоем (1,5 мм) теплопроводящего материала (алюминия). На рис. 2 представлены результаты испытаний на нагрев одной и двух катушек при предельно допустимых плотнос-

тах тока. Так, одна катушка при плотности тока 35 А/мм^2 за время $t = 10 \text{ мин}$ нагревается до установившейся температуры 75°C . Для двух катушек условия теплоотвода хуже, поэтому стабилизация температуры наблюдалась при меньшей плотности тока (30 А/мм^2).

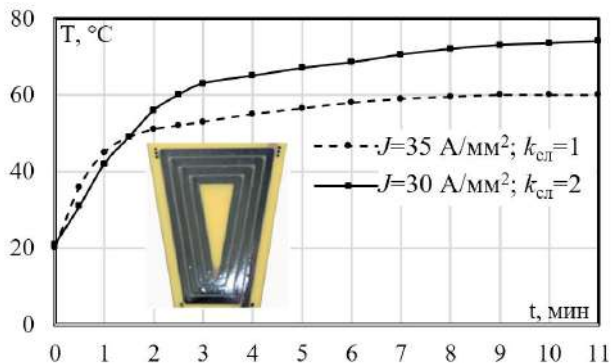


Рис. 2 – Зависимость температуры нагрева печатной обмотки от времени

Численные исследования различной конфигурации магнитной системы. Хорошо известно, что в электрических машинах с постоянными магнитами на роторе и зубцами на статоре важной характеристикой является величина зубцового момента, действующего со стороны ротора на зубцы статора. Наличие и большая величина этого момента может значительно ухудшить энергетические показатели проектируемой электрической машины.

Поэтому на следующем этапе исследований при помощи компьютерного моделирования в пакете Infolytica Magnet было изучено влияние изменения конфигурации магнитной системы как на максимальные значения зубцового момента, так и на величины основного электромагнитного момента для модели с одним слоем печатных обмоток. Были рассмотрены модели с зубцами и без зубцов на статоре, а также модели с зубцами при сдвиге одного статора относительно другого на некоторый угол в пределах полюсного деления.

На рис. 3 показана картина магнитного поля исследуемой электрической машины с зубцами на статоре и смещением одного статора относительно другого на угол $7,5^\circ$.

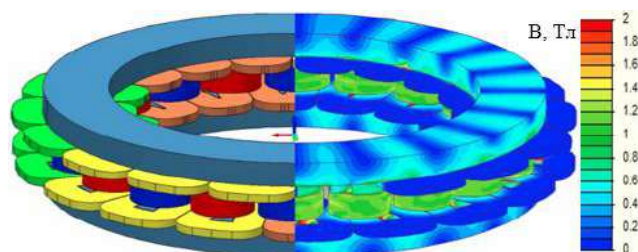


Рис. 3 – Картина магнитного поля с зубцами на статоре

Расчеты моделей электрической машины с печатными обмотками проводились методом конечных элементов в пакете Infolytica Magnet в трехмерной постановке с учетом насыщения стали магнитопровода [9]. Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора рассчитывались для момента

времени, когда ток в фазе А максимальный и условно положительный А(+), фазе В и С – условно отрицательный и равный половине от максимального В(-0,5) и С(-0,5). Таким образом при расчете магнитного поля и электромагнитного момента в исследуемой модели плотность тока в фазе А задавалась равной $J_A = 35 \text{ А/мм}^2$, а в фазе В и С – $J_B = J_C = 17,5 \text{ А/мм}^2$.

Из рисунка видно, что большие значения индукции (1,8-2 Тл) наблюдаются только в очень малых зонах магнитопровода, вблизи острых вершин зубцов статора, остальные части магнитопровода не насыщены.

На рис. 4 приведены значения максимального зубцового момента при смещении одного статора относительно другого на угол 0° , 5° , $7,5^\circ$ и 10° . Следует отметить, что использование соотношения полюсов на роторе и зубцов на статоре 20/18 обеспечивает низкие (по отношению к основному электромагнитному моменту) значения зубцового момента. При угле смещения в $7,5^\circ$ зубцовый момент минимален, поэтому в дальнейших исследованиях этот угол смещения был принят основным.

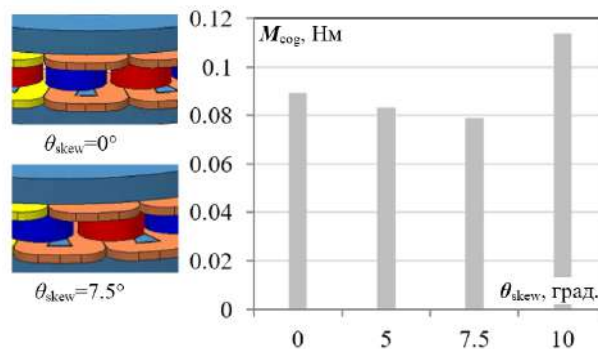


Рис. 4 – Зависимость зубцового момента от относительного угла смещения статоров

На рис. 5 показаны расчетные зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора при наличии зубцов на статоре и без зубцов и смещении одного статора относительно другого на угол $7,5^\circ$. Величина максимального электромагнитного момента для магнитной системы с полюсами составляет 10,2 Нм. В то время как для системы без полюсов – 7,6 Нм. Таким образом наличие зубцов высотой всего 3,3 мм позволяет увеличить максимальное значение электромагнитного момента электрической машины на 26%.

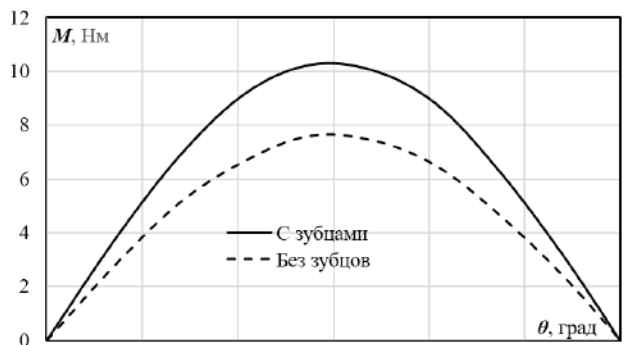


Рис. 5 – Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора

В результате предыдущих исследований [10] было установлено, что в электрических машинах с аксиальным потоком целесообразно применять цилиндрические постоянные магниты вместо трапецеидальных. Электромагнитный момент для цилиндрических магнитов примерно на 10% меньше, чем в электрической машине с трапецеидальными магнитами. Кроме этого, существенно упрощается изготовление ротора с магнитами цилиндрической формы.

Также следует отметить, что стоимость магнитов цилиндрической формы ниже стоимости магнитов трапецеидальной формы, а отверстия под магниты производятся стандартной фрезой за один прием. Таким образом, применение магнитов цилиндрической формы для электрических машин с аксиальным магнитным потоком предпочтительнее, чем трапецеидальных магнитов. Поэтому в экспериментальном образце и дальнейших исследованиях использовались постоянные магниты цилиндрической формы.

Основываясь на полученных результатах численных расчетов и ранее выполненных исследований, была спроектирована и изготовлена экспериментальная модель электрической машины, параметры которой приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры экспериментальной модели электрической машины

Наименование	Значение
Внешний диаметр статора – D_a , мм	193
Внутренний диаметр статора – D_i , мм	149
Диаметр магнитов – D_{pm} , мм	25
Толщина магнитов – h_{pm} , мм	10
Количество магнитов – n_{pm}	20
Тип магнитов	N45SH
Ширина токопроводящего слоя – b_{layer} , мм	12
Число слоев в печатной плате – k_{layer}	18
Толщина одного токопроводящего слоя – h_{layer} , мм	0,05
Толщина печатной обмотки – h_{pw} , мм	3,3
Число витков в одном слое – W_1	4
Число витков в одной обмотке – W_{coil}	68
Ширина витка в каждом слое – b_{coil}	2,4
Расстояние между витками в каждом слое – $b_{b,t}$, мм	0,5
Площадь витка в слое – $S_{лит}$, мм ² ($h_{layer} \times b_{coil}$)	0,12
Площадь обмоточного окна – S_{wa} , мм ²	42,7
Площадь меди в обмоточном окне – S_{Cu} , мм ²	8,16
Коэффициент заполнения обмоточного окна, k_{fill} factor	0,19
Число фаз, m	3
Число катушек печатной обмотки, n_k	18
Рабочий зазор между ротором и статором – δ , мм	1,5
Количество печатных обмоток на каждом статоре – k_{cl}	1

Численные и экспериментальные исследования. На рис. 6 представлены фотографии опытного образца в сборе и фрагмента печатной обмотки. Опытный образец испытывался в генераторном режиме. При проведении испытаний печатные обмотки каждой фазы соединялись последовательно. Направления токов в катушках печатной обмотки показано на рис.6 в центре. Фазы соединены в звезду и далее, через выпрямительный мост подсоединялась активная нагрузка. Были проведены испытания опытного образца и численное моделирование соответствующей ему компьютерной модели для трех значений частоты вращения ротора – $n = 1700$, $n = 2000$ и $n = 2300$ об/мин.

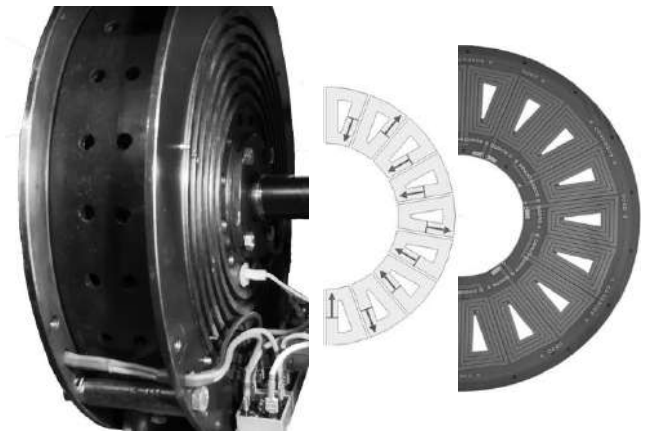


Рис. 6 – Экспериментальный образец электрической машины с печатными обмотками

При заданной скорости вращения варьировалась величина активной нагрузки, фиксировались соответствующие значения напряжения на нагрузке и тока в нагрузке. Кроме того, измерялась температура на поверхности печатных обмоток опытного образца. На рис. 7 показаны экспериментальные и расчетные зависимости напряжения и мощности в нагрузке от тока нагрузки для исследуемого образца.

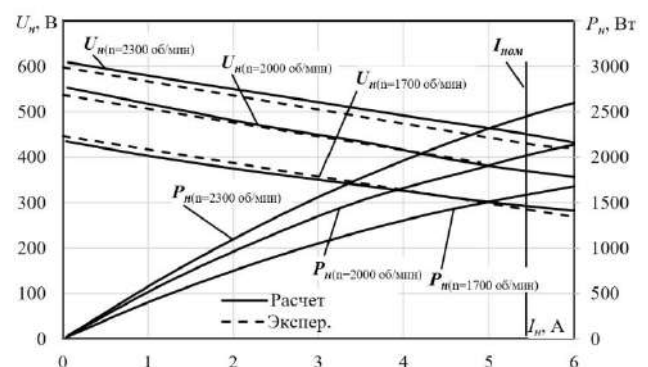


Рис. 7 – Зависимость напряжения и мощности в нагрузке от тока нагрузки для образца с одним слоем печатных обмоток

Номинальной плотности тока $J = 35$ А/мм² соответствует номинальный фазный ток $I_\phi = 4,2$ А и соответственно ток в нагрузке равный $I_n = 5,4$ А. При номинальном токе соответствующие номинальные значения мощности следующие: $P_{ном(n=1700 \text{ об/мин})} = 1,6$ кВт при $n = 1700$ об/мин; $P_{ном(n=2000 \text{ об/мин})} = 1,9$ кВт при

$n = 2000$ об/мин; $P_{\text{ном}(n=2300 \text{ об/мин})} = 2,4$ кВт при $n = 2300$ об/мин. Следует отметить хорошее совпадение расчета с экспериментом – среднее расхождение между экспериментальными и расчетными значениями не превышает $\varepsilon = 4\%$. Таким образом, компьютерная модель адекватно описывает электромагнитные процессы в исследуемой электрической машине и может служить основой для дальнейших исследований.

На следующем этапе исследований рассматривалась электрическая машина с двумя слоями печатных обмоток на каждом из статоров. На рис. 8 показан общий вид и картина магнитного поля такой электрической машины, полученная в результате компьютерного моделирования. Следует отметить, что большие значения индукции (2 Тл) наблюдаются только в зубцах статора, остальные части магнитопровода не насыщены.

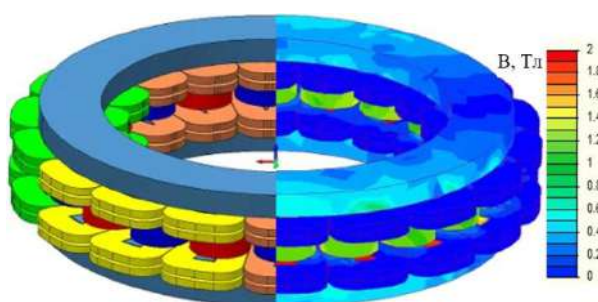


Рис. 8 – Картина магнитного поля с двумя слоями печатных обмоток

На рис. 9 показаны расчетные зависимости электромагнитного момента для модели с обмоткой в один слой ($k_{\text{сл}} = 1$) и с обмоткой в 2 слоя ($k_{\text{сл}} = 2$). При этом, в соответствии с проведенными исследованиями по нагреву, для обмотки в два слоя задавалась плотность тока равная $J = 30$ А/мм². Исследования показали, что благодаря выбранному соотношению количества зубцов статора и числу магнитов ротора зубцовый момент исследуемой электрической машины очень мал по сравнению с основным электромагнитным моментом (менее 1%), поэтому на следующем этапе исследовалась модель электрической машины без относительного смещения статоров.

Из рис. 9 следует, что применение двух слоев обмоток позволяет увеличить максимальный электромагнитный момент на 36%.

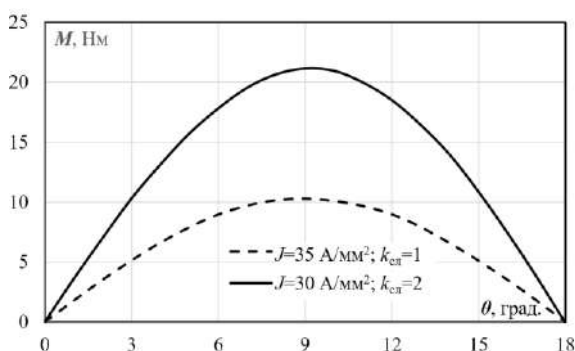


Рис. 9 – Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора для моделей с одним и двумя слоями печатных обмоток

Далее были проведены численное моделирование генераторного режима исследуемой электрической машины с двумя слоями обмоток. Зависимость напряжения и мощности в нагрузке от тока нагрузки показаны на рис. 10. Расчет производился для случая, когда печатные обмотки каждой фазы соединялись параллельно. При номинальном фазном токе равном $I_{\text{ф}} = 14,4$ А, ток в нагрузке равен $I_{\text{н}} = 18,4$ А. При этом токе и частоте вращения $n = 2000$ об/мин мощность в нагрузке была равной $P_{\text{ном}(n=2000 \text{ об/мин})} = 5100$ Вт, плотность тока в обмотках при этом токе составляла $J = 30$ А/мм². Соответственно при номинальном токе и частоте вращения $n = 3000$ об/мин мощность в нагрузке была равной $P_{\text{ном}(n=3000 \text{ об/мин})} = 7900$ Вт.

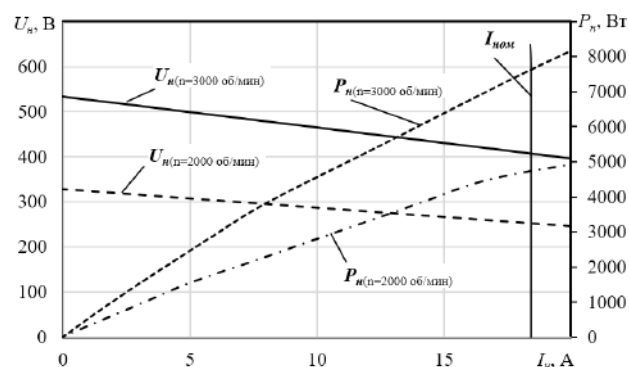


Рис. 10 – Зависимость напряжения и мощности в нагрузке от тока нагрузки для модели с двумя слоями печатных обмоток

Таким образом, результаты численных и экспериментальных исследований подтверждают, что применение печатных обмоток позволяет получить электрические машины с хорошими удельными характеристиками. В табл. 2 приведены результаты сравнения основных характеристик электрических машин при одном и двух слоях печатных обмоток на статоре.

Таблица 2 – Сравнение основных характеристик электрической машины при одном и двух слоях печатных обмоток на статоре

Наименование	$k_{\text{сл}} = 1$	$k_{\text{сл}} = 2$
Плотность тока в катушке – J , А/мм ²	35	30
Номинальный ток фазный в обмотке – $I_{\text{ф}}$, А	4,2	14,4
Номинальный ток в нагрузке – $I_{\text{н}}$, А	5,4	18,4
Номинальная мощность при $n = 2000$ об/мин – $P_{\text{ном}}$, Вт	1920	4500
Номинальная мощность при $n = 3000$ об/мин – $P_{\text{ном}}$, Вт	3430	7500

Для сравнения: расчетное значение номинальной мощности исследуемой электрической машины с двумя слоями печатных обмоток при частоте вращения $n = 3000$ об/мин равно $P_{\text{ном}(n=3000 \text{ об/мин})} = 7,5$ кВт; номинальная мощность асинхронного электродвигателя

АИР112М2 при частоте вращения $n = 2900$ об/мин также равна $P = 7.5$ кВт.

Габариты исследуемой электрической машины без учета выходного вала и клеммной коробки, следующие: диаметр×осевая длина – 320×80 мм; соответственно габариты АИР112М2 без вала и клеммной коробки – 224×353 . То есть объем асинхронного электродвигателя при одинаковой мощности примерно в 2 раза больше, чем объем исследуемой электрической машины с печатными обмотками.

Выводы.

Предложенные модели позволят выполнять расчеты электромеханических процессов в электрической машине с двухсторонним статором, аксиальным потоком, постоянными магнитами и многослойными печатными обмотками. Для заданных размеров электрической машины с многослойными печатными обмотками (наружный диаметр статора, осевая длина статора) проведены численные исследования и определено влияние зубцов статора на величину электромагнитного момента, а также влияние относительного смещения двух частей статора на величину электромагнитного момента. В результате численных исследований установлено, что наличие зубцов на статоре позволяет увеличить электромагнитный момент электрической машины примерно на 36% по сравнению с вариантом магнитной системы без зубцов на статоре.

Изготовлен опытный образец электрической машины с многослойными печатными обмотками и определены в генераторном режиме зависимости напряжения и мощности от тока нагрузки. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 4 %. Это свидетельствует об адекватности расчетных моделей и результаты расчета вполне оправдано могут быть применены и для других значений мощности генераторов с другой конфигурацией магнитной системы и другими ее размерами.

Также было проведено численное моделирование электрической машины с двумя слоями печатных обмоток и было установлено, что применение двухслойной обмотки позволяет увеличить номинальную мощность в 2.2 раза по сравнению с электрической машиной с однослойной печатной обмоткой.

Список литературы

1. Высокомомментные и малоинерционные двигатели. – Режим доступа: <https://studopedia.org/14-12933.html>. – Дата звертання: 06.02.2020.
2. Электродвигатели с малоинерционным ротором. – Режим доступа: <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/elektrodvigatelei-s-maloinercionnym-rotorom.html>. – Дата звертання: 06.02.2020.
3. Xiaoyuan Wang. Winding design and analysis for a disc-type permanent-magnet synchronous motor with a PCB stator / Xiaoyuan Wang, Huaiddong Lu, Xiang Li // *Energies*. – 2018. – Vol.11. – Iss. 12. – Pp. 1-5. doi:10.3390/en1123383.
4. Wang X. Geometry optimize of printed circuit board stator winding in coreless axial field permanent magnet motor / X. Wang, C. Li, F. Lou // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. – 2016. – Hangzhou. – 17-20 Okt. 2016. – Pp. 1-6. doi:10.1109/VPPC.2016.7791695.
5. Marignetti F. Electromagnetic design and modeling of a two-phase axial-flux printed circuit board motor / F. Marignetti, G. Volpe, S. M. Mirimani, C. Cecati // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2018. – Vol. 65. – No 1. – Pp. 67-76. doi:10.1109/TIE.2017.2716865.
6. Yan G. Axial-flux permanent magnet brushless motor for slim vortex pumps / G. Yan, L. Hsu, J. Wang, M. Tsai, X. Wu // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2009. – Vol. 45. – No 10. – Pp. 4732-4735. doi:10.1109/TMAG.2009.2022499.
7. ThinGap high power density brushless motors. – Режим доступу: <https://www.thingap.com/>. Дата звертання: 07.02.2020.
8. Ситников А. В. Дисковый вентильный электродвигатель с печатной обмоткой разомкнутого типа / А. В. Ситников, Е. Н. Баранов // *Радиооптика. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн.* – 2015. – № 03. – С. 42–50. doi:10.7463/rdopt.0315.0789748.
9. Гребеников В. В. Сравнительный анализ электродвигателей с различной конфигурацией магнитных систем // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2017. – № 1 (1223). – С. 119–12.
10. Dobzhanskyi O. Axial-flux PM disk generator with magnetic gear for oceanic wave energy harvesting / O. Dobzhanskyi, E. Hossain, E. Amiri, R. Gouws, V. Grebenikov, L. Mazurenko, M. Pryjmak, R. Gamaliia // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – Pp. 44813-44822. doi:10.1109/ACCESS.2019.2908348.

References (transliterated)

1. *Vysokomomentnye i maloinercionnye dvigateli*. Available at: <https://studopedia.org/14-12933.html>. (accessed 06.02.2020)
2. *Elektrodvigatelei s maloinercionnym rotorom*. Available at: <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/elektrodvigatelei-s-maloinercionnym-rotorom.html>. (accessed 06.02.2020)
3. Xiaoyuan Wang, Huaiddong Lu, Xiang Li. Winding design and analysis for a disc-type permanent-magnet synchronous motor with a PCB stator // *Energies*. 2018, Vol.11, Iss. 12, pp. 1-5. doi:10.3390/en1123383.
4. Wang X., Li C., Lou F. Geometry optimize of printed circuit board stator winding in coreless axial field permanent magnet motor // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2016, Hangzhou, 17-20 Okt. 2016, pp. 1-6. doi:10.1109/VPPC.2016.7791695.
5. Marignetti F., Volpe G., Mirimani S. M., Cecati C.. Electromagnetic design and modeling of a two-phase axial-flux printed circuit board motor // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018, Vol. 65, No 1, pp. 67-76. doi:10.1109/TIE.2017.2716865.
6. Yan G., Hsu L., Wang J., Tsai M., Wu X.. Axial-flux permanent magnet brushless motor for slim vortex pumps // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009, Vol. 45, No 10, pp. 4732-4735. doi:10.1109/TMAG.2009.2022499.
7. ThinGap high power density brushless motors. – Available at: <https://www.thingap.com/>. (accessed: 07.02.2020)
8. Sitnikov A. V., Baranov E. N. Diskovyy ventilnyy elektrodvigatel s pechatnoy obmotkoj razomknutoyo tipa [Disc valve electric motor with open-air printed wind]. *Radiooptika. MGTU im. N.E. Bauman. Elektron. zhurn.* 2015, № 03, pp. 42–50. (Rus) doi:10.7463/rdopt.0315.0789748.
9. Grebenikov V. V. Sravnitelnyy analiz elektrodvigatelej c razlichnoj konfiguraciej magnitnyh system [Comparative analysis of electric motors with various configuration of magnetic systems]. *Visnik NTU «HPI»*. Seriya: Elektrichni mashini ta elektromehanichne peretvorennya energiyi. 2017, № 1 (1223), pp. 119–12. (Rus)
10. Dobzhanskyi O., Hossain E., Amiri E., Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Pryjmak M., Gamaliia R.. Axial-flux PM disk generator with magnetic gear for oceanic wave energy harvesting // *IEEE Access*. 2019, Vol. 7, pp. 44813-44822. doi:10.1109/ACCESS.2019.2908348/

Поступила (received) 11.02.2020

В. В. Гребеніков. Електрична машина з двостороннім статором, осевим магнітним потоком, постійними магнітами та багат шаровими друкованими обмотками // В. В. Гребеніков, Р. В. Гамалія, В. С. Попков, О. М. Соколовський, Н. В. Богаєнко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 84-90. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.14.

Гребеников В. В. Электрическая машина с двухсторонним статором, осевым магнитным потоком, постоянными магнитами и многослойными печатными обмотками // В. В. Гребеников, Р. В. Гамалія, В. С. Попков, А. Н. Соколовский, Н. В. Богаєнко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 84-90. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.14.

Grebenikov V. V. The electric machine with two-sided stator, axial magnetic flux, permanent magnets and multilayered printing windings // V. V. Grebenikov, R. V. Gamaliia, V. S. Popkov, A. N. Sokolovsky, N. V. Bogaenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – 2020. – No. 3 (1357). – P. 84-90. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.14.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гребеніков Віктор Володимирович (Гребеников Виктор Владимирович, Grebenikov Viktor Vladimirovich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, провідний науковий співробітник, тел. (067)441-73-72; e-mail: elm1153@gmail.com.

Гамалія Ростислав Віталійович (Гамалія Ростислав Витальевич, Gamaliia Rostyslav Vitaliyovich) – кандидат фізико-математичних наук, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, старший науковий співробітник, тел. (067) 763-18-54; e-mail: rgamaleya@gmail.com.

Попков Володимир Сергійович (Попков Владимир Сергеевич, Popkov Vladimir Sergeevich) – Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, інженер, тел. (067) 440-13-05; e-mail: popkov2018@ukr.net.

Соколовський Олександр Миколайович (Соколовский Александр Николаевич, Sokolovskij Aleksandr Nikolaevich) – ДП «Гальванотехніка» ПАО «Київський завод «Радар», заступник директора, тел. (097) 220-53-02; e-mail: a.sokolovskyy.72@gmail.com.

Богаєнко Микола Володимирович (Богаєнко Николай Владимирович, Bogaenko Nikolaj Vladimirovich)