

ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ДИСКОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ

Дисковые электромеханические преобразователи энергии находят широкое применение в электрических транспортных средствах, насосах, центрифугах, подъемниках и робототехнике. Они широко используются в низкоскоростных и высокоскоростных системах. Применение дисковых электромеханических преобразователей энергии в качестве генераторов оправдано в ветроэнергетических установках, микротурбинах, портативных генераторных установках, буровых установках, приводах лифтов и электромобилях. Диапазон мощности дисковых электромеханических преобразователей энергии в настоящее время варьируется от долей ватт до нескольких мегаватт.

В статье приведен анализ научно-технической литературы по дисковым электрическим машинам. Дан сравнительный анализ характеристик дисковых и цилиндрических преобразователей энергии, в результате которого выявлено, что дисковые машины с аксиальным магнитным потоком наиболее подходят для применения в качестве сервоприводов и генераторов, где их свойства обладают преимуществами по сравнению с цилиндрическими машинами. При этом дисковые электрические машины, в отличие от электрических машин с цилиндрическим ротором, при одинаковых массогабаритных показателях обладают минимальными аксиальными размерами, что позволяет интегрировать их в различные элементы существующих систем, то есть в ряде случаев дисковая конструкция обладает более высокой эргономичностью.

Рассмотрены основные конструктивные схемы дисковых машин, такие как односторонние и двухсторонние, пазовые и беспазовые, с магнитопроводами и без, с внутренними или внешними роторами, с поверхностными или внутренними постоянными магнитами, как одиночные или модульные машины, представлены их основные достоинства и недостатки. Приведено описание конструктивных узлов дисковых машин, применяемых в различных областях, а также примеры их коммерческой реализации. Приведено обоснование выбора материалов, применяемых дисковых электрических машинах.

Ключевые слова: дисковая электрическая машина, аксиальный магнитный поток, постоянные магниты, обзор конструкций.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной научно-технической задачей является создание новых и совершенствование существующих конструктивных схем электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ). Главной тенденцией в совершенствовании ЭМПЭ является минимизация массогабаритных показателей с одновременным увеличением энергетических характеристик и функциональных возможностей.

Одним из решений данной задачи является создание высокоскоростных ЭМПЭ с высококоэффициентными постоянными магнитами (ВПМ), что определяется рядом их преимуществ, таких как высокие энергетические характеристики, отсутствие необходимости во внешних источниках для возбуждения энергии, простота конструкции и минимальные габариты. Значительный прогресс в создании ВПМ с высокой плотностью энергии, снижение их стоимости и прогресс в силовой электронике сыграли важную роль в развитии и применении ЭМПЭ с ВПМ во многих областях.

При этом одной из перспективных конструкций ЭМПЭ с ВПМ является электрическая машина с аксиальным магнитным потоком, также называемая дисковой (ДЭМПЭ). Данный тип ЭМПЭ является привлекательной альтернативой стандартным цилиндрическим ЭМПЭ с радиальным магнитным потоком благодаря их основным преимуществам: улучшенным массогабаритным показателям, малым аксиальным размерам, малой мощности возбуждения, удобной компоновке с приводом или исполнительным механизмом.

В связи с обозначенными преимуществами в настоящее время ведется активная работа по исследованию и разработке конструкций ДЭМПЭ, повышению их надежности и отказобезопасности как в двигательном, так и в генераторном режимах. Данная работа посвящена анализу различных конструктивных схем, а также обзору примеров реализации ДЭМПЭ.

СРАВНЕНИЕ ДИСКОВОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИЙ

С высокими темпами развития новых материалов и улучшением технологий охлаждения стало возможным дальнейшее увеличение удельной мощности электрических машин. Однако для машин цилиндрической конструкции увеличение данного параметра имеет некоторые ограничения [1-5]. Эти ограничения связаны с использованием радиального магнитного потока и не могут быть устранены без существенного изменения в конструкции. Машины с аксиальным магнитным потоком имеют более высокую удельную мощность и меньшие габариты, чем машины с радиальным магнитным потоком и цилиндрической конструкцией [2-4, 6].

В общем преимущества дисковых электрических машин с аксиальным магнитным потоком по сравнению с цилиндрическими машинами можно резюмировать следующим образом [3, 7]:

- дисковые машины имеют гораздо больший диаметр, чем цилиндрические, что сказывается на улучшении охлаждения;
- дисковые машины имеют плоский и несколько регулируемый воздушный зазор;
- меньший объем магнитопроводов, применяемых в дисковых машинах, позволяет сконструировать их с меньшей удельной массой;

- топология дисковой машины позволяет создавать модульные конструкции, в которых количество модулей регулируется по необходимой выходной мощности;

- чем больше внешний диаметр сердечника, тем большее количество полюсов можно расположить, что повышает частоту в дисковых машинах.

Таким образом, дисковые машины с аксиальным магнитным потоком наиболее подходят для применения в качестве сервоприводов и генераторов, где их свойства обладают преимуществами по сравнению с цилиндрическими машинами.

В работах [2, 8-10] были рассмотрены количественные исследования машин радиальным и аксиальным магнитным потоком с точки зрения габаритных размеров и удельной мощности. Сравнение производительности цилиндрической машины и ряда дисковых машин различных конфигураций с различными номинальными мощностями [11] показывает, что дисковая машина имеет меньший объем и меньшую массу активных материалов при заданной номинальной мощности, чем цилиндрическая машина.

В работе [12] (табл. 1) сравниваются проектные данные и рабочие характеристики дискового электродвигателя без магнитопровода на статоре мощностью 10 кВт, 750 об/мин и эквивалентного электродвигателя с постоянными магнитами цилиндрической конструкции с шихтованным статором. В обоих двигателях количество фаз равно 3, число полюсов $2p=16$ и входная частота 100 Гц.

Как видно из табл. 1, КПД дискового электродвигателя мощностью 10 кВт на 1,2% выше, а удельная мощность выше на 82%, поскольку масса активных материалов в дисковой конструкции на 45% ниже, чем в цилиндрической. При отсутствии тока в обмотках нормальные силы между статором и ротором не возникают, однако нормальные силы между роторами с ВПМ достаточно велики.

Дисковые ЭМПЭ с ВПМ, в отличие от ЭМПЭ с цилиндрическим ротором, при одинаковых массогабаритных показателях обладают минимальными аксиальными размерами, что позволяет интегрировать их в различные элементы существующих систем, то есть в ряде случаев ДЭМПЭ обладают более высокой эргономичностью, что определяет перспективы их применения в летательных аппаратах. Кроме того, динамические перегрузки и усилия, воздействующие на ротор ЭМПЭ, в ДЭМПЭ могут оказаться несколько ниже, чем у ЭМПЭ с цилиндрическим ротором, что также определяет применение ДЭМПЭ.

Таблица 1
Сравнение электродвигателей дисковой и цилиндрической конструкции

Параметр	Дисковая конструкция	Цилиндрическая конструкция
Входное линейное напряжение, [В]	227	220
Момент на валу, [Нм]	131	133
КПД	0,925	0,960
Коэффициент мощности	0,991	0,96
Индукция в воздушном зазоре, [Тл]	0,58	0,78
Масса ВПМ, [кг]	12,4	1,6
Масса активных материалов, [кг]	22,5	41,1

Конструкции дисковых ЭМПЭ

С точки зрения конструкции ДЭМПЭ могут быть сконструированы как односторонние или двухсторонние, пазовые и беспазовые, с магнитопроводами и без них, с внутренними или внешними роторами, с поверхностными или внутренними ВПМ, как одиночные или модульные машины.

В случае двухсторонних топологий возможно использование либо внешнего статора, либо внешнего ротора, при этом наибольшими преимуществами обладает топология с внешним ротором [13]. Различные конструкции ДЭМПЭ можно классифицировать следующим образом:

- односторонние дисковые машины:
 - с пазовым статором (рис. 1, а);
 - с беспазовым статором;
 - с явнополюсным статором;
- двухсторонние дисковые машины:
 - с внутренним статором (рис. 1, б):
 - с пазовым статором;
 - с беспазовым статором;
 - с магнитопроводом на статоре;
 - без магнитопровода на статоре (рис. 1, г);
 - без магнитопровода на роторе и статоре:
 - с явнополюсным статором;
 - с внутренним ротором (рис. 1, в):
 - с пазовым статором;
 - с беспазовым статором;
 - с явнополюсным статором;
- многоступенчатые (модульные) дисковые машины (рис. 3).

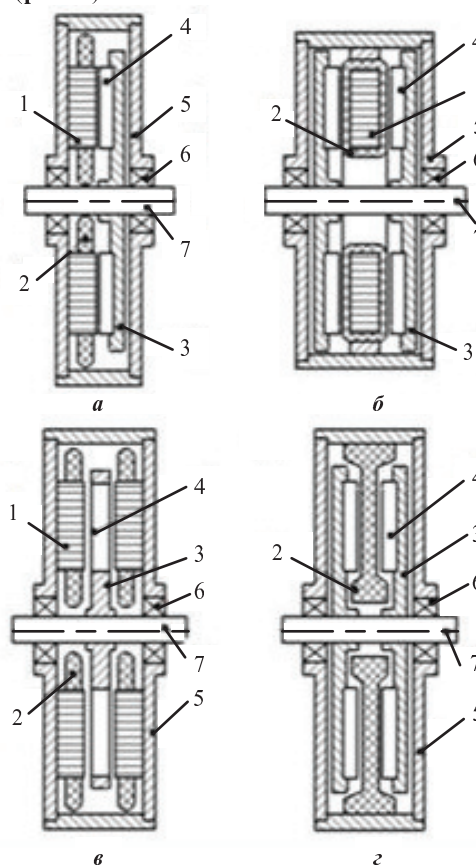


Рис. 1. Основные конструкции дисковых машин:
1 – магнитопровод статора; 2 – обмотка статора;
3 – ротор; 4 – ВПМ; 5 – корпус; 6 – подшипники; 7 – вал

Воздушный зазор пазовой дисковой машины относительно мал. Средняя плотность магнитного потока в воздушном зазоре уменьшается из-за влияния открытых пазов. Для оценки этого изменения существует понятие фиктивного увеличения воздушного зазора. Связь между фиктивным и физическим воздушным зазором выражается с помощью коэффициента Картера, который больше единицы [14].

Для дисковых машин с беспазовым статором зазор намного больше и равен сумме воздушного зазора и толщины всех немагнитных материалов (обмоток, изоляции), через которые проходит основной магнитный поток. Поскольку нет пазов, коэффициент Картера равен единице. Беспазовый статор имеет такие преимущества, как простота сборки статора, уменьшение потерь в роторе, магнитного насыщения и акустического шума. Из недостатков следует отметить использование большего количества материала ВПМ и значительные потери на вихревые токи в проводниках обмотки [15].

В двухсторонней дисковой машине с явнополюсным статором катушки наматываются на полюса, шихтованные в осевом направлении. Для получения трехфазного дискового двигателя с самозапуском количество полюсов статора должно отличаться от числа полюсов ротора, например 12 полюсов статора и 8 полюсов ротора [16-18].

В зависимости от области применения и условий эксплуатации беспазовые статоры могут иметь ферромагнитные сердечники или быть полностью безжелезными. В конфигурации статора без магнитопровода снижаются потери на вихревые токи и гистерезис. Кроме того, исключаются осевые магнитные силы притяжения между статором и ротором при отсутствии тока в обмотке [15, 19, 20].

Односторонняя конструкция дисковой машины проще, чем двухсторонняя, однако выходная мощность ниже.

В двухсторонней машине с внутренним ротором, собранным из ВПМ, обмотка якоря расположена на двух статорах с ферромагнитным сердечником. Диск с ВПМ вращается между двумя статорами. Двухсторонняя дисковая машина с параллельным соединением обмоток статора может работать, даже если одна обмотка выйдет из строя [21-23].

Двухсторонняя машина с внутренним кольцевым сердечником статора имеет многофазную беспазовую обмотку (тороидального типа), намотанную на поверхность ферромагнитного сердечника статора [16, 24-26]. В этой машине кольцевой сердечник статора собран из стальной ленты. Двухсторонний ротор с ВПМ расположен по двум сторонам статора (рис. 2).

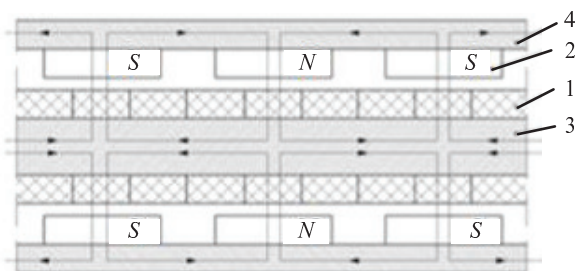


Рис. 2. Двухсторонняя дисковая машина с внутренним беспазовым статором: 1 – обмотки; 2 – ВПМ; 3 – ярмо статора; 4 – ярмо ротора

Кольцевой сердечник статора также может быть выполнен пазовым (рис. 3). В случае пазового статора воздушный зазор мал и магнитная индукция в воздушном зазоре выше, чем в беспазовой конструкции [24].

Дисковые машины с безжелезными статорами имеют обмотку, расположенную на немагнитной и изолированной конструкции (рис. 4). Для обеспечения необходимой величины магнитного потока в воздушном зазоре требуется значительно больший объем ВПМ по сравнению с ферромагнитной конструкцией статора. При работе на относительно высокой частоте могут возникать значительные потери вихревых токов в проводниках обмотки статора [27].

Существует ограничение на увеличение выходной мощности дисковой машины, которое может быть достигнуто путем увеличения диаметра. Для решения данной задачи создаются модульные дисковые машины. На рис. 5 представлена конструкция многодисковой машины, состоящей из 4 модулей. Статоры в данной машине могут быть соединены последовательно или параллельно [28-33].

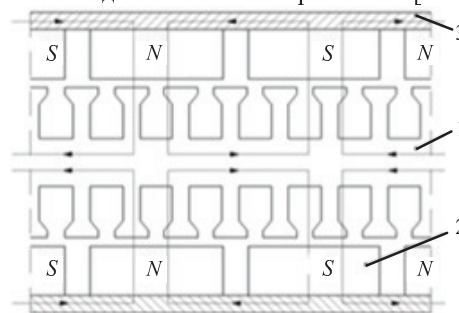


Рис. 3. Двухсторонняя дисковая машина с внутренним пазовым статором: 1 – пазовый статор; 2 – ВПМ; 3 – спишка ротора

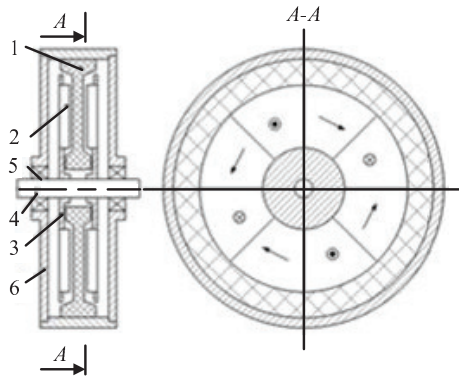


Рис. 4. Двухсторонняя дисковая машина без магнитопроводов на статоре и роторе: 1 – обмотка беспазового безжелезного статора; 2 – ВПМ; 3 – двойной ротор; 4 – вал; 5 – подшипники; 6 – корпус

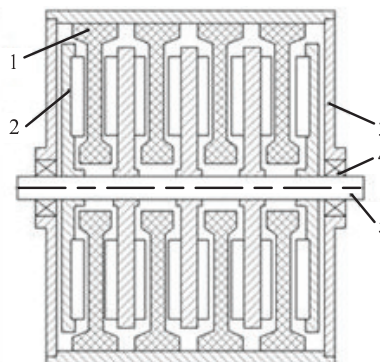


Рис. 5. Модульная дисковая машина: 1 – обмотка статора; 2 – роторный узел; 3 – корпус; 4 – подшипники; 5 – вал

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСКОВЫХ ЭМПЭ

Дисковые ЭМПЭ находят применение в электрических транспортных средствах, насосах, центрифугах, подъемниках и робототехнике. Они широко используются в низкоскоростных и высокоскоростных системах. Применение ДЭМПЭ в качестве генераторов оправдано в ветроэнергетических установках, микро-турбинах, портативных генераторных установках, буровых установках, приводах лифтов и электромобилях. Диапазон мощности ДЭМПЭ в настоящее время варьируется от долей ватт до нескольких мегаватт.

Генерирование электроэнергии

ДЭМПЭ являются компактными, высокоэффективными и надежными генераторами. В высокоскоростных генераторах минимизация аэродинамических потерь требует создание роторов с малыми диаметрами, в ДЭМПЭ эта проблема решается применением модульной конструкции, состоящей из нескольких статоров и роторов, при этом отсутствие магнитопроводов на статорах повышает массоэнергетические показатели, снижает синхронное реактивное сопротивление, упрощает регулирование напряжения и повышает эффективность. Такой генератор имеет компактную конструкцию, низкую массу и высокую эффективность. По данным компании Turbo Genset, Великобритания, 100 кВт, 60 000 об/мин модульный дисковый генератор с внешним диаметром 180 мм и длиной 300 мм, имеет массу в 12 кг, при этом генератор полностью охлаждается воздухом [34].

Миниатюрный портативный генератор военного применения, показанный на **рис. 6**, используется в микро-турбинах для зарядки переносных батарей. При частоте вращения от 150000 до 250000 об/мин и наружном диаметре ротора 50 мм генератор может генерировать около 1 кВт электроэнергии.

Применение низкоскоростных дисковых генераторов наиболее оправдано в ветроэнергетических установках. В **табл. 2** приведены технические характеристики пятифазных дисковых генераторов производства компании Kestrel Wind Turbines, ЮАР. Все три типа генераторов Kestrel используют шихтованные сердечники.

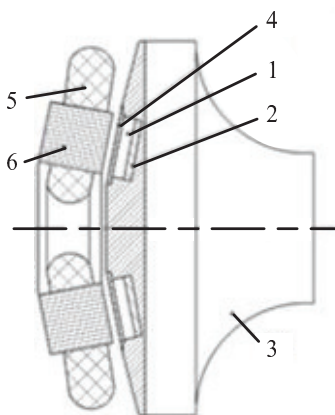


Рис. 6. Высокоскоростной дисковый генератор, интегрированный в микро-турбинную установку:
 1 – ВПМ; 2 – магнитопровод ротора; 3 – ротор микро-турбинной установки; 4 – немагнитное бандажное кольцо; 5 – обмотка статора; 6 – магнитопровод статора

Таблица 2

Технические характеристики пятифазных дисковых генераторов

Тип генератора	Kestrel 600	Kestrel 800	Kestrel 2000
Мощность, [Вт]	400	800	2000
Максимальная мощность, [Вт]	600	850	2200
Число полюсов (2р)	48	48	200
Частота вращения, [об/мин]	1100	1010	925
Диаметр ротора, [м]	1,2	2,1	3,6
Номинальная скорость ветра, [м/с]	12,5	11,5	10,5
Масса, [кг]	23	35	80

Привод для электромобилей

Электромобили подразделяются на две основные категории: гибридные и аккумуляторные. Приводные электродвигатели для электромобилей должны соответствовать следующим требованиям:

- высокая удельная мощность;
- широкий диапазон частот вращения и крутящего момента;
- высокая надежность и прочность при различных условиях эксплуатации, например, при высоких и низких температурах, дожде, снеге, вибрациях и т.д;
- низкая стоимость.

Гибридные электромобили сочетают двигатель внутреннего сгорания обычного автомобиля с приводным электродвигателем, что ведет к экономии топлива. Электрический мотор/генератор обычно расположен между двигателем внутреннего сгорания и коробкой передач (**рис. 7**).

Номинальная мощность электродвигателей, применяемых в гибридных электромобилях, составляет от 10 до 75 кВт. Из-за ограниченного пространства между двигателем внутреннего сгорания и коробкой передач, электродвигатели для гибридных электромобилей имеют малую аксиальную длину и большие диаметры. Дисковые электродвигатели, имеющие высокий крутящий момент, идеально подходят под требования гибридных автомобилей [35].

В аккумуляторном электромобиле энергия, хранящаяся в аккумуляторной батарее, преобразуется в механическое движение и обратно при рекуперативном торможении.

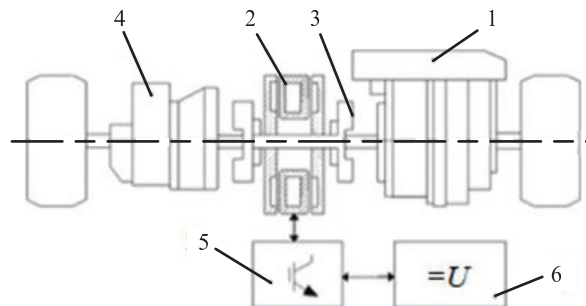


Рис. 7. Схема привода гибридного электродвигателя:
 1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – дисковый мотор-генератор; 3 – муфта; 4 – коробка передач; 5 – инвертор; 6 – аккумулятор

В аккумуляторных электромобилях дисковые электродвигатели встроены в колеса транспортного средства (рис. 8) [36, 37]. С помощью дискового электродвигателя дифференциальный механизм может быть заменен электронной дифференциальной системой [24].

Электромеханическая приводная система значительно упрощается, когда двигатель установлен в колесе, поскольку отпадает необходимость в приводных валах и шарнирах равных угловых скоростей [24].

Судовые силовые установки

Конструкция высокогабаритного двухстороннего дискового электродвигателя, разработанного Kamap Aerospace, США, показана на рис. 9 [38]. Технические характеристики высокогабаритных двигателей с аксиальным магнитным потоком производства Kamap приведены в табл. 3.

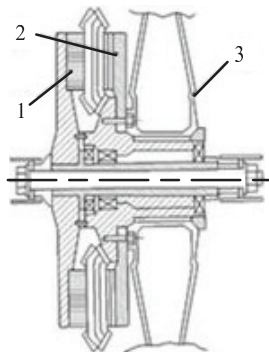


Рис. 8. Односторонняя дисковая машина, встроенная в колесо: 1 – узел статора; 2 – узел ротора; 3 – диск колеса

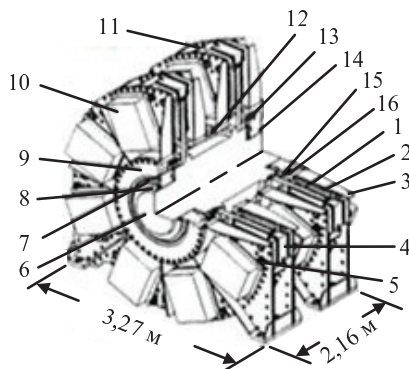


Рис. 9. Высокогабаритный двухсторонний дисковый электродвигатель: 1 – ВПМ; 2 – статорный узел; 3 – корпус; 4 – ударный демпфер; 5 – амортизатор; 6 – вал ротора; 7 – зажим диска ротора; 8 – уплотнительный узел вала; 9 – держатель подшипника; 10 – сегмент статора; 11 – центральный каркас; 12 – распорка; 13 – диск ротора; 14 – подшипниковый узел; 15 – уплотнитель ротора; 16 – уплотнительный узел ротора

Таблица 3

Технические характеристики высокогабаритных двигателей с аксиальным магнитным потоком

Характеристики	PA44-5W-002	PA44-5W-001	PA57-2W-001
Число полюсов, 2р	28	28	36
Мощность, [кВт]	336	445	746
Фазное напряжение, [В]	700	530	735
Частота вращения, [об/мин]	3600	6000	4000
КПД, %	0,95	0,96	0,96
Масса, [кг]	195	195	340
Диаметр корпуса, [м]	0,648	0,648	0,787
Длина корпуса, [м]	0,224	0,224	0,259

Электродвигательные установки для подводных лодок требуют высокой выходной мощности, высокой эффективности, бесшумности и малых габаритов [39, 40]. Дисковые электродвигатели могут отвечать этим требованиям и работать без сбоев более 100 000 ч, при охлаждении морской водой. Эти двигатели практически бесшумны и работают с минимальным уровнем вибрации. Удельная выходная мощность при номинальных рабочих условиях может превышать 2,2 кВт/кг, а удельный момент 5,5 Нм/кг [40].

Дисковый электродвигатель может быть спроектирован с использованием двух роторов [41]. Эта топология машины нашла свое применение в морских силовых установках, которые используют дополнительный противовращающийся ходовой винт [41]. Для достижения противоположного вращения двух роторов необходимо создать в статоре противовращающиеся магнитные поля. Каждый ротор имеет свой собственный вал, который вращает ходовой винт, то есть двигатель имеет два коаксиальных вала, которые разделены радиальным подшипником. Схема показана на рис. 10 [41].

Мобильные буровые установки

Габариты буровых установок варьируются от небольших электроприводных инструментов до крупных установок для нефтяных месторождений.

Дисковые двигатели большой мощности особенно подходят для переносного бурового оборудования благодаря своей компактной конструкции, низкой массе, точной регулировке скорости, высокой эффективности и надежности.

В приводе буровой системы ECI [42], изготовленном Tesco Corporation, Канада, применены дисковые электродвигатели с жидкостным охлаждением, что обеспечивает следующие основные преимущества:

- высокую точность в управлении частотой и моментом;
- модульную конструкцию, позволяющую продолжить бурение при необходимости увеличения мощности;
- прямое подключение к установкам по шинам переменного тока и интерфейсам с существующими источниками питания.

Технические характеристики буровой установки приведены в табл. 4.

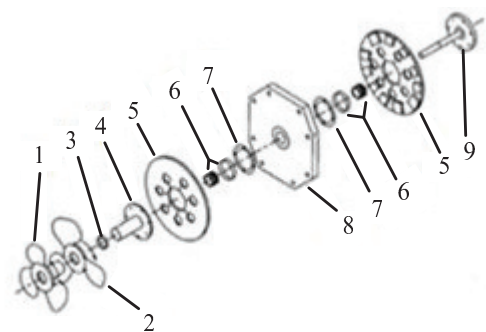


Рис. 10. Разобранный вид дисковой машины с противовращающимся ротором: 1 – основной винт; 2 – противовращающийся винт; 3 – радиальный подшипник; 4 – внешний вал; 5 – ротор с ВПМ; 6 – подшипники; 7 – монтажное кольцо; 8 – статор; 9 – внутренний вал

Таблица 4
Технические характеристики
мобильной буровой установки

Характеристики	ЕСІ 670	ЕСІ 1007
Масса, [кг]	5,9	6,3
Рабочий ход, [м]	4,34	4,34
Момент, [Нм]	7,6	11,4
Частота вращения, [об/мин]	187	187
Длина, [м]	6,4	6,4

Приводы лифтов

Концепция безредукторного электромеханического привода для лифтов была введена в 1992 году компанией Kone Corporation в Финляндии [43]. С помощью дискового электродвигателя (табл. 5) машинный зал управления лифтами может быть заменен компактным прямым электромеханическим приводом [43].

В табл. 6 перечислены характеристики двухдискового двигателя мощностью от 58 до 315 кВт [43].

Миниатюрные дисковые электродвигатели

Миниатюрные двигатели находят применение в приводах жестких дисков, сотовых телефонах, мобильных сканерах и бытовой электронике [44].

Миниатюрные бесколлекторные дисковые двигатели хорошо адаптированы к большому объему производства с низкой стоимостью. Чтобы получить жесткость, катушки статора выполняют наплавлением. Статор монтируется на односторонней печатной плате. Каждая деталь может быть изготовлена с использованием стандартных методов отливки, штамповкой со специальной конструкцией для простой и эффективной сборки.

Миниатюрные поворотные приводы, разработанные для применения в автомобильной промышленности, обеспечивают вращательное движение в ограниченном диапазоне. Основными особенностями таких типов приводов являются:

- бесконтактный принцип действия;
- постоянный крутящий момент, не зависящий от углового положения;
- линейная характеристика крутящего момента;
- два направления вращения;
- высокий удельный момент.

Таблица 5
Технические характеристики дисковых приводов лифтов

Параметры	МХ05	МХ06	МХ10
Мощность, [кВт]	2,8	3,7	6,7
Момент, [Нм]	240	360	800
Частота вращения, [об/мин]	113	96	80
КПД	0,83	0,85	0,91
Диаметр шкива, [м]	0,34	0,4	0,48
Скорость лифта, [м/с]	1	1	1

Таблица 6
Характеристики двухдисковых электродвигателей для безредукторных подъемников

Параметры	МХ32	МХ40	МХ100
Мощность, [кВт]	58	92	315
Момент, [Нм]	3600	5700	14000
Частота вращения, [об/мин]	153	153	214
КПД	0,92	0,93	0,95
Скорость лифта, [м/с]	6	8	13,5

Приводы жестких дисков компьютеров

Основными требованиями к приводным двигателям компьютерных жестких дисков являются: высокий пусковой момент, ограниченный ток питания, низкая вибрация и шум, физические ограничения по объему и форме, защита от загрязнений.

Электродвигатели дисковой конструкции (рис. 11) могут развивать более высокий пусковой момент, чем двигатели радиальным магнитным потоком. Недостатком одностороннего дискового электродвигателя, показанного на рис. 11, а, является высокая сила притяжения между статором с ферромагнитным сердечником и ротором с установленными на нем ВПМ. В двухсторонних дисковых электродвигателях привода жестких дисков статор не имеет ферромагнитного сердечника, и при нулевом токе сила притяжения не создается. Статор имеет трехфазную обмотку, изготовленную методом литографии. Чтобы уменьшить воздушный зазор и увеличить плотность магнитного потока, в роторе и в нижней части ступицы создаются конструкционные изгибы, в направлении к центрам катушек статора (рис. 11, б). Согласно [45] для дискового привода жестких дисков с наружным диаметром статора 51 мм, 180 витков на фазу и коэффициентом крутящего момента 0,00659 Нм/А, потребление составляет 0,09 А при 13900 об/мин.

Акустический шум привода жестких дисков с шарикоподшипниками обычно ниже 30 дБ (А) и прогнозируемое среднее время между отказами 100 000 ч. Шпиндели жесткого диска в настоящее время переходят от шарикоподшипников к жидкостным динамическим подшипникам. Такие подшипники производят меньше шума и исправны в течение более длительного периода времени.

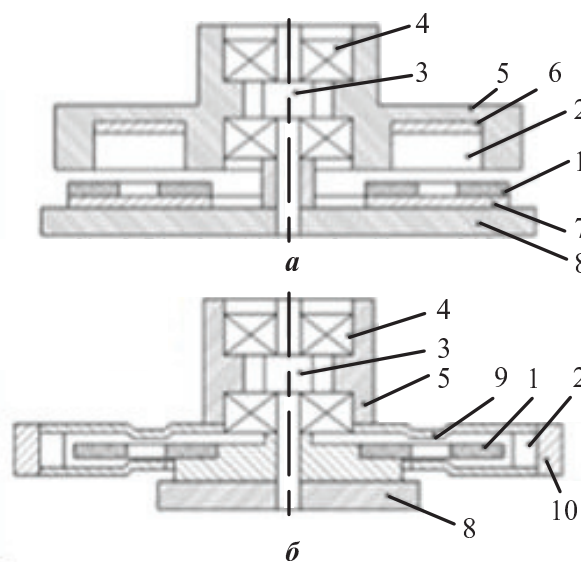


Рис. 11. Конструкция дискового привода жесткого диска компьютера: 1 – катушки статора; 2 – ВПМ; 3 – вал; 4 – подшипники; 5 – ступица; 6 – ярмо ротора; 7 – ярмо статора; 8 – основание; 9 – конструкционные изгибы; 10 – немагнитное кольцо

ПРИМЕРЫ КОММЕРЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ
ТОПОЛОГИЙ ДИСКОВЫХ ЭМПЭ

С сердечником на статоре

Примером коммерческого применения двухстороннего дискового электродвигателя с ВПМ и ферромагнитным сердечником является продукт производства компании Mavilor, Испания [46]. Внешние статоры имеют пазовые кольцевые сердечники из электротехнической стальной ленты. Внутренний ротор не имеет ферромагнитного сердечника и ВПМ устанавливаются на немагнитном вращающемся диске.

Более низких массогабаритных показателей можно добиться применением аморфных сплавов. Так, например, двухсторонний синхронный дисковый генератор с сердечником статора, собранным из ленты аморфного сплава производства компании LE Incorporated, США [47], имеет оъем на 60% ниже, чем у классических синхронных генераторов при одинаковой мощности.

Дисковые машины с ферромагнитными сердечниками на статоре и роторе имеют более высокие значения синхронных реактивных сопротивлений, чем машины без ферромагнитных сердечников. Они отрицательно влияют на регулирование напряжения в генераторном режиме.

Основными потерями в таких машинах являются, среди прочего, потери в стали, которые зависят от частоты и плотности магнитного потока. Частота изменения потока в сердечнике, в свою очередь, определяется частотой вращения и числом пар полюсов. Поскольку дисковые машины имеют большое количество полюсов (минимум $2p=6$), то частоты вращения ограничены, чтобы держать в пределах потери в стальных сердечниках. Для высоких частот обычно используется шихтованная электротехническая сталь толщиной менее 0,2 мм, или магнитопроводы из аморфной стали.

Без сердечника на статоре

Компания Vodine Electric Company, США [48] производит дисковые электродвигатели e-TORQ диаметрами 178 и 356 мм с обмотками на безжелезном статоре и двойными стальными роторами с ВПМ (рис. 12, а). Конструкция безжелезного статора улучшает управление на низких частотах вращения, обеспечивает линейные характеристики момента, из-за отсутствия магнитного насыщения, и позволяет создать максимальный крутящий момент, до десяти раз превышающий номинальный. Данные двигатели могут работать бесперебойно на чрезвычайно низких частотах вращения, даже если они питаются от стандартного преобразователя, кроме того, высокий крутящий момент позволяет в некоторых случаях устранять дорогостоящие редукторы.



Рис. 12. Дисковая машина без магнитопровода на статоре: а – основной вид; б – дисковая машина, интегрированная в колесо автомобиля

Двигатели e-TORQ диаметром 356 мм успешно использовались для прямого привода автомобиля, питаемого от солнечных панелей, участвовавшего в 2003 году в American Solar Challenge (рис. 12, б).

В зависимости от применения и условий эксплуатации статор дисковой машины может не иметь магнитопровода. Данная топология дисковой машины имеет внутренний статор и двойной внешний ротор с ВПМ, которые установлены в стальные диски ротора.

Ввиду отсутствия стальных участков на статоре устраняются потери на вихревые токи и гистерезис. Из-за отсутствия потерь в стали данная дисковая машина может работать с большей эффективностью, чем обычная. С другой стороны, благодаря увеличенному немагнитному воздушному зазору, используется больший объем ВПМ, чем эквивалентная машина с ферромагнитным сердечником на статоре.

Без магнитопроводов на статоре и роторе

Конструкция безжелезного дискового ЭМПЭ была предложена Lynx Motion Technology, США, для применения в качестве электродвигателя и генератора, имеющих высокую удельную мощность и высокий КПД [49]. Конструкция безжелезной дисковой машины находит применение в системах генерирования электроэнергии и в безредукторных электромеханических приводах, где требуются электродвигатели с высоким моментом, что в целом уменьшает шум и ошибки позиционирования.

Конструкция ДЭМПЭ без сердечника на статоре и безпазовое исполнение не только устраняет момент от зубцовых гармоник, но также увеличивает область, занятую проводниками, что повышает крутящий момент и позволяет более эффективно использовать ВПМ [49]. Обмотки статора залиты в высокопрочную, теплопроводную эпоксидную смолу. Такая конструкция обеспечивает целостность конструкции машины и эффективно ослабляет высокочастотную вибрацию, когда двигатель подвергается работе с широтно-импульсной модуляцией.

Компания CSIRO Telecommunications and Industrial Physics, Австралия, производит встроенные в колеса дисковые электродвигатели без магнитопроводов для автомобилей, питаемых солнечными панелями [37]. Кроме того, в CSIRO делают безжелезные дисковые электродвигатели как с ВПМ, приклеенными к поверхностям стальных дисков, так и с ВПМ, образующими массив Халбаха без стальных конструкций на роторе. Структура двигателя, диск с ВПМ и обмотка статора показаны на рис. 13 [37].

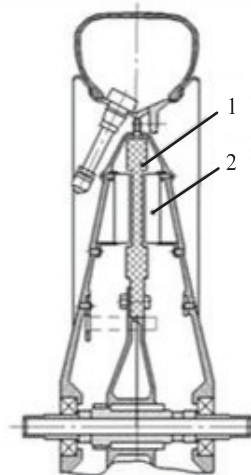


Рис. 13. Двухсторонняя дисковая машина без магнитопроводов на статоре и роторе, интегрированная в колесо автомобиля: 1 – обмотки; 2 – ВПМ

Компания LaunchPoint Technologies (США) разрабатывает электрические машины для применений, связанных с электрическими беспилотными летательными аппаратами. Данные электродвигатели имеют воздушное охлаждение и создают собственный поток воздуха, поэтому не требуется дополнительная система охлаждения или вентилятор. Наибольший интерес представляет дисковый электродвигатель мощностью 5 кВт и массой 0,625 кг с массивами Халбаха на двухстороннем роторе и безжелезном статоре для применения в качестве привода винтов беспилотных летательных аппаратов и наземного применения в колесах шасси [50].

Высокая удельная мощность, обеспечиваемая этой конструкцией двигателя, позволяет увеличить время автономной работы от аккумуляторных батарей и производить больший момент в широком диапазоне частот вращения.

Благодаря применению ВПМ статоры и роторы дисковых машин могут быть изготовлены без ферромагнитных сердечников [12, 37, 51, 52]. При этом ВПМ образуют массив Халбаха и крепятся к ротору, выполненному из немагнитного материала. Конструкция с полностью безжелезным исполнением позволяет уменьшить массу и повысить КПД машины.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ УЗЛЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЭМПЭ

Конструкция ротора

Магнитные цепи роторов дисковых машин обеспечивают магнитный поток возбуждения и могут быть спроектированы:

- ВПМ установлены на ферромагнитном кольце или диске, который служит в качестве магнитопроводящего ядра (рис. 14);
- ВПМ образуют массив Халбаха без ферромагнитного сердечника (рис. 15).

Формы ВПМ в дисковых машинах обычно выполняются трапециевидальными, круглыми или полукруглыми (рис. 16). Форма ВПМ влияет на распределение магнитного поля в воздушном зазоре и на содержание высших гармоник. Качество выходного напряжения (гармоники ЭДС) дисковых генераторов зависит от формы ВПМ и расстояния между соседними магнитами [53].

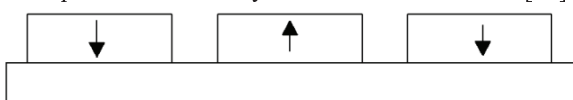


Рис. 14. Односторонняя конструкция ротора с чередующимися полюсами

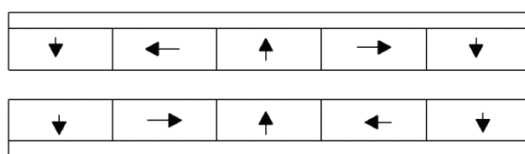


Рис. 15. Двухсторонняя конструкция ротора с ортогональным распределением ВПМ, образующими массив Халбаха

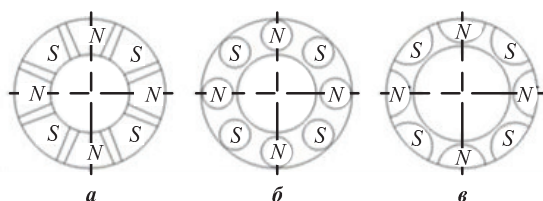


Рис. 16. Формы ВПМ в дисковых машинах: а – трапециевидальные; б – круглые; в – полукруглые

Поскольку магнитный поток ротора неподвижен, то используются сердечники в виде колец или дисков из магнитомягкой стали толщиной от 4 до 6 мм.

В двухсторонних дисковых машинах с двойными роторами ВПМ могут образовывать массив Халбаха [54-56]. Ключевая концепция массива Халбаха заключается в том, что направление вектора намагниченности ВПМ изменяется в функции расстояния вдоль массива (рис. 17) [54-56]. На практике угол между векторами намагниченности соседних магнитов может быть равен 90, 60 или 45°.

При этом характерно, что магнитное поле с одной стороны (на рабочей поверхности сборки) удваивается, а на другой – практически равно нулю.

Массив Халбаха имеет следующие преимущества:

- индукция магнитного поля в 1,4 раза больше, чем в обычной сборке с чередующимися полюсами;
- не требует магнитопровода для замыкания магнитного потока, и ВПМ могут быть размещены непосредственно на неферромагнитной опорной конструкции (алюминий, пластик, титан);
- магнитное поле имеет более синусоидальное распределение, чем в обычной сборке с чередующимися полюсами;
- массив Халбаха имеет очень слабое магнитное поле на обратной стороне.

Материал ВПМ

Благодаря высоким энергетическим характеристикам ВПМ (SmCo, NdFeB) находят широкое применение в электромеханических системах [29, 30, 57]. При выборе материала ВПМ следующие факторы являются определяющими:

- магнитные характеристики (Br, Hc, BHmax);
- устойчивость к высоким температурам (SmCo до 3500С; NdFeB до 2500С);
- стоимость (материал ВПМ из SmCo дороже, чем материал NdFeB);

С учетом вышеперечисленных факторов, материал ВПМ из SmCo представляется более эксплуатационно оправданным выбором.

Число пар полюсов

Число полюсов оказывает влияние на конструкцию и энергоэффективность электрических машин. В высокоскоростных системах прослеживается тенденция использования малого числа полюсов (2p=2, 2p=4), что позволяет снизить потери в стали на перемагничивание. Однако ДЭМПЭ в основном выполняются многополюсными, минимум 2p=6 [12]. Применение большого числа полюсов позволяет уменьшить высоту магнитопровода ротора [55], что соответственно снижает его массу. Кроме того, возможность создания конструкций ДЭМПЭ без стальных сердечников устраняет необходимость в использовании малого числа полюсов.

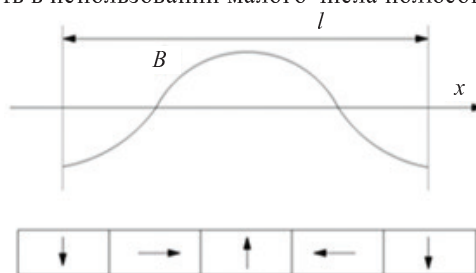


Рис. 17. Распределение магнитного поля в массиве Халбаха

Конструкция статора

Как было указано выше, статор дисковой машины может быть выполнен с магнитопроводом и без магнитопровода.

При наличии магнитопровода сердечник статора дисковой машины выполняется шихтованным. Большинство шихтованных сердечников для статоров дисковых машин изготовлены из лент изотропной электро-технической стали со стандартной толщиной от 0,12 до 0,64 мм. Для минимизации потерь в сердечнике при высоких частотах перемагничивания изотропные электро-технические стали заменяют аморфными сплавами.

Конструкция статора без магнитопровода предполагает закрепление обмотки на дисковой несущей конструкции (ступице), выполненной из немагнитного и непроводящего материала. Для минимизации потерь от вихревых токов обмотка статора выполняется из большого числа многожильных проводников малого диаметра.

В дисковых машинах применяются распределенные, сосредоточенные или тороидальные типы обмоток.

Тороидальные обмотки дисковых машин наматываются на кольцевые сердечники и применяются в конструкциях с двойным ротором. К достоинствам тороидальной обмотки относятся малый вылет лобовых частей, что обеспечивает низкие массогабаритные показатели, простота конструкции сердечника статора, а также простота создания любого количества фаз. Недостатком данного типа обмотки является ее сложная технология укладки, а также увеличение воздушного зазора на величину высоты обмотки.

Сосредоточенные (зубцовые) обмотки характеризуются малым вылетом лобовых частей, простой технологией укладки, однако имеют недостатки в виде пространственных гармоник, искажающих форму ЭДС.

В распределенных обмотках амплитуды высших гармоник значительно меньше, чем в сосредоточенных обмотках и тем самым форма кривой ЭДС менее искажена, кроме того данный тип обмотки наиболее легко использовать в конструкции статора без магнитопровода. Недостатками распределенных обмоток являются большие вылеты лобовых частей, а также сложность технологии укладки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог вышесказанному, необходимо отметить, что дисковые электромеханические преобразователи энергии находят широкое применение в электрических транспортных средствах, насосах, центрифугах, подъемниках и робототехнике. Они широко используются в низкоскоростных и высокоскоростных системах. Применение дисковых электромеханических преобразователей энергии в качестве генераторов оправдано в ветроэнергетических установках, микротурбинах, портативных генераторных установках, буровых установках, приводах лифтов и электромобилях. Диапазон мощности дисковых электромеханических преобразователей энергии в настоящее время варьируется от долей ватт до нескольких мегаватт.

Представленный анализ научно-технической литературы по дисковым электрическим машинам показывает перспективность конструкций дисковых электрических машин с аксиальным магнитным потоком. Показано, что данный тип электромеханических преоб-

разователей энергии является привлекательной альтернативой стандартным цилиндрическим машинам с радиальным магнитным потоком. К основным преимуществам дисковых электромеханических преобразователей энергии относят: улучшенные массогабаритные показатели за счет малых аксиальных размеров и высокие удельные характеристики.

Приведенный сравнительный анализ характеристик дисковых и цилиндрических преобразователей энергии показывает, что дисковые машины с аксиальным магнитным потоком наиболее подходят для применения в качестве сервоприводов и генераторов, где их свойства имеют преимущества по сравнению с цилиндрическими машинами. При этом дисковые электрические машины, в отличие от электрических машин с цилиндрическим ротором, при одинаковых массогабаритных показателях обладают минимальными аксиальными размерами, что позволяет интегрировать их в различные элементы существующих систем, то есть в ряде случаев дисковая конструкция обладает более высокой эргономичностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Campbell P. The magnetic circuit of an axial flux DC electrical machine, IEEE Trans. MAG-11(5): pp. 1541-1543. 1975.
2. Chan C.C. Axial-field electrical machines: design and application, IEEE Trans. EC-2(2): pp. 294-300. 1987.
3. Gieras J.F., Wing M. Permanent magnet motor technology: design and applications. 2nd ed., Marcel Dekker, New York. 2002. 661 p.
4. Leung W.S., Chan C.C. A new design approach for axial-field electrical machine, IEEE Trans. PAS-99(4): pp. 1679-1685. 1980.
5. Miti G.K., Renfrew A.C. Field weakening performance of the TORUS motor with rectangular current excitation, Int. Conf. on Electr. Machines IECM'98, Istanbul, Vol. 1, pp. 630-633. 1998.
6. Campbell P. Principle of a PM axial field DC machine, Proceedings of IEE, vol. 121, no. 1, pp. 1489-1494. 1974.
7. Chan C.C. Axial-field electrical machines with yokeless armature core, PhD Thesis, University of Hong Kong. 1982.
8. Amarutunga G.A.J., Acarnley P.P., McLaren P.G. Optimum magnetic circuit configurations for PM aerospace generators, IEEE Trans on AES, Vol. 21(2): pp. 230-255. 1985.
9. Huang S., Luo J., Leonardi F., Lipo T.A. A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations, IEEE Trans. EC-14(2): pp. 185-192. 1999.
10. Zhang Z., Profumo F., Tonconi A. Axial flux versus radial flux permanent magnet motors, Electromotion, vol. 3, pp. 134-140. 1996.
11. Sitapati K., Krishnan R. Performance comparisons of radial and axial field permanent magnet brushless machines, IEEE Trans. IA-37(5): pp. 1219-1226. 2001.
12. Gieras J.F., Gieras I.A. Performance analysis of a coreless permanent magnet brushless motor, IEEE 37th IAS Meeting, Pittsburgh, PA, U.S.A. 2002.
13. Caricchi F., Crescimbeni F., Fedeli E., Noia G. Design and construction of a wheel-directly-coupled axial-flux PM motor prototype for EVs, IEEE-IAS Annual Meeting, IAS-29, part 1, pp. 254-261. 1994.
14. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах / пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. М.: Энергия, 1981. 352 с.
15. Chalmers B.J., Hamed S.A., Baines G.D. Parameters and performance of a high-field permanent magnet synchronous motor for variable-frequency operation, Proc IEE Pt B

- 132(3): pp. 117-124. 1985.
16. Lukaniszyn M., Wrobel R., Mendrela A., Drzewoski R. Towards optimization of the disc-type brushless d.c. motor by changing the stator core structure, Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'2000, vol. 3, Espoo, Finland, pp. 1357-1360. 2000.
 17. Lukaniszyn M., Mendrela E., Jagiello M., Wrobel R. Integral parameters of a disc-type motor with axial stator flux, Zesz. Nauk.Polit. Slaskiej, Vol. 200, Elektryka, No. 177, pp. 255-262. 2002.
 18. Mendrela E., Lukaniszyn M., Macek-Kaminska K. Electronically commutated d.c. brushless disc motors (in Polish). Warsaw: Gnome. 2002.
 19. Caricchi F., Crescimbin F., Fedeli E., Noia G. Design and construction of a wheel-directly-coupled axial-flux PM motor prototype for EVs, IEEE-IAS Annual Meeting, IAS-29, part 1, pp. 254-261. 1994.
 20. Evans P.D., Easham J.F. Slot-less alternator with ac-side excitation, Proc. of IEE, Vol. 130, No. 6, pp. 399-406. 1983.
 21. Hrabovcova V., Brslica V. Disk synchronous machines with permanent magnets – electric and thermal equivalent circuits, Electr. Drives Symp., Capri, Italy, pp. 163-169. 1990.
 22. Klug L. Axial field a.c. servomotor, Electr. Drives and Power Electronics Symp. EDPE'90, Kosice, Slovakia, pp. 154-159. 1990.
 23. Klug L., Guba R. Disc rotor a.c. servo motor drive, Electr. Drives and Power Electronics Symp. EDPE'92, Kosice, Slovakia, pp. 341-344. 1992.
 24. Gair S., Eastham J.F., Profumo F. Permanent magnet brushless d.c. drives for electric vehicles, Int. Aeagean Conf. on Electr. Machines and Power Electronics ACEMP'95, Turkey, pp. 638-643. 1995.
 25. Spooner E., Chalmers B., El-Missiry M.M. A compact brushless d.c. machine, Electr. Drives Symp. EDS'90, Capri, Italy, pp. 239-243. 1990.
 26. Zhang Z., Profumo F., Tenconi A. Axial flux interior PM synchronous motors for electric vehicle drives, Symp. on Power Electronics, Electr. Drives, Advanced Electr. Motors SPEEDAM'94, Taormina, Italy, pp. 323-328. 1994.
 27. Wang R., Kamper M.J. Evaluation of eddy current losses in axial flux permanent magnet (AFPM) machine with an ironless stator, IEEE 37th IAS Meeting, Pittsburgh, PA, U.S.A. 2002.
 28. Афонин А.А. Дисковые электрические машины с вращающимися векторами намагниченности постоянных магнитов // Доп. НАН України, 2004. №2. С. 94-101.
 29. Афонин А.А., Гребеников В.В. Структура электрических машин дискового типа // Праці ІЕД НАНУ. 2002. №1. С. 56-70.
 30. Ahmed A.B., de Cachan L.E. Comparison of two multidisc configurations of PM synchronous machines using an elementary approach, Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'94, Vol. 1, Paris, France, pp. 175-180. 1994.
 31. Chillet C., Brissonneau P., Yonnet J.P. Development of a water cooled permanent magnet synchronous machine. Int. Conf. on Synchronous Machines SM100, Vol. 3, Zürich, Switzerland, pp. 1094-1097. 1991.
 32. Eastham, J.F., Profumo, F., Tenconi, A., Hill-Cottingham R., Coles, P., Gianolio, G. Novel axial flux machine for aircraft drive: design and modeling, IEEE Trans. MAG-38(5): pp. 3003-3005. 2002.
 33. El-Hasan T.S., Luk, P.C.K., Bhinder, F.S., Ebaid M.S. Modular design of high-speed permanent-magnet axial-flux generators. IEEE Trans. MAG-36(5): pp. 3558-3561. 2000.
 34. ULEV-TAP URL: <http://www.ulev-tap.org>
 35. Acarnley P.P., Mecrow B.C., Burdess J.S., Fawcett J.N., Kelly J.G., Dickinson P.G. Design principles for a flywheel energy store for road vehicles, IEEE Trans. IA-32(6): pp. 1402-1408. 1996.
 36. Patterson D., Spee R. The design and development of an axial flux permanent magnet brushless d.c. motor for wheel drive in a solar powered vehicle, IEEE Trans. IA-31(5): pp. 1054-1061. 1995.
 37. Ramsden V.S., Mecrow B.C., Lovatt H.C. Design of an in wheel motor for a solar-powered electric vehicle, Proc. of EMD'97, pp. 192-197. 1997.
 38. Cascio A.M. Modeling, analysis and testing of orthotropic stator structures, Naval Symp. on Electr. Machines, Newport, RI, USA, pp. 91-99. 1997.
 39. Coilgun research spawns mighty motors and more. Machine Design 9: pp. 24-25, 1993.
 40. Mongeau P. High torque/high power density permanent magnet motors, Naval Symp. on Electr. Machines, Newport, RI, USA, pp. 9-16. 1997.
 41. Caricchi F., Crescimbin F., Santini E. Basic principle and design criteria of axial-flux PM machines having counter rotating rotors, IEEE Trans. IA-31(5): pp. 1062-1068. 1995.
 42. Top drives URL: <http://www.tescocorp.com/ProductSales/TopDrives/default.aspx>
 43. Hakala H. Integration of motor and hoisting machine changes the elevator business, Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'2000, Vol. 3, Finland, pp. 1242-1245. 2000.
 44. Kleen S., Ehrfeld W., Michel F., Nienhaus M., Stolting H.D. Penny-motor: A family of novel ultraflat electromagnetic micromotors, Int. Conf. Actuator'2000, Bremen, Germany, pp. 193-196. 2000.
 45. Jang G.H., Chang J.H. Development of an axial-gap spindle motor for computer hard disk drives using PCB winding and dual air gaps, IEEE Trans. MAG-38(5): pp. 3297-3299. 2002.
 46. Mavilor's motors are specially suited for high response servo drives. URL: <http://www.mavilor.es>
 47. GenSmart, High-efficiency, high power density, variable speed electric motors, generators and drive systems. URL: <http://www.lightengineering.com>
 48. e-TORQ Motors URL: <http://www.bodine-electric.com/etorq/>
 49. Kessinger R.L. Introduction to SEMA motor technology. Kinetic Art and Technology, Greenville, IN, U.S.A. 2002.
 50. Electric machines for propulsion URL: <http://www.launchpnt.com>
 51. Kessinger R.L., Robinson S. SEMA-based permanent magnet motors for high-torque, high-performance, Naval Symp. on Electr. Machines, U.S.A., pp. 151-155. 1997.
 52. Kessinger R.L., Stahura P.A., Receveur P.E., Dockstader K.D. Interlocking segmented coil array. U.S. Patent No. 5, 744, 896. 1998.
 53. El-Hasan T., Luk P.C.K. Magnet topology optimization to reduce harmonics in high speed axial flux generators, IEEE Trans. MAG-39(5): pp. 3340-3342. 2003.
 54. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare-earth cobalt material, Nuclear Instruments and Methods, Vol. 169, pp. 1-10. 1980.
 55. Halbach K. Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets, Nuclear Instruments and Methods, Vol. 187, pp. 109-117. 1981.
 56. Halbach K. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings, J. Appl. Physics, Vol. 57, pp. 3605-3608. 1985.
 57. Sadeghirad M. Designing a coreless high-speed axial flux PM generator for microturbines // Journal of computer & robotics №1, pp. 63-67. 2011.

Поступила в редакцию 02 декабря 2017 г.

OVERVIEW OF DISK DESIGNS OF ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS FOR VARIOUS APPLICATIONS

Flur R. Ismagilov

D.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Russia.

Viacheslav E. Vavilov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Russia.

Ildus F. Sayakhov

Postgraduate Student of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Russia.

Disk electromechanical energy converters are widely used in electric vehicles, pumps, centrifuges, hoists and robotics. They are used in low-speed and high-speed applications. The use of disc electromechanical energy converters as generators is justified in wind power plants, microturbines, portable generator sets, drilling rigs, elevator drives and electric vehicles. The power range of disk electromechanical energy converters currently varies from watt to several megawatts.

The article considered analysis of the scientific and technical literature on disk electric machines. A comparative analysis of the characteristics of disk and cylindrical energy converters is made, as a result of which it was revealed that disk machines with an axial magnetic flux are most suitable for use as servomechanisms and generators where their properties have advantages over cylindrical machines. In this case, disk electric machines, unlike electric machines with a cylindrical rotor, have the same axial dimensions for the same weight and size parameters, which makes it possible to integrate them into various elements of existing systems, that is, in some cases, the disk structure has a higher ergonomics.

The basic design schemes of disk machines such as single-sided and double-sided, slotted and unrestricted, with and without magnetic cores, with internal or external rotors, with surface or internal permanent magnets, like single or modular machines, are presented. A description is given of the structural units of disk machines used in various fields, as well as examples of their commercial implementation. The substantiation of the choice of materials, applied disk electric machines is suggested.

Keywords: disk type electric machine, axial magnetic flux, permanent magnets, construction overview.

REFERENCES

- Campbell P. The magnetic circuit of an axial flux DC electrical machine, IEEE Trans. MAG-11(5): pp. 1541-1543. 1975. 661 p.
- Chan C.C. Axial-field electrical machines: design and application, IEEE Trans. EC-2(2): pp. 294-300. 1987.
- Gieras J.F., Wing M. Permanent magnet motor technology: design and applications. 2nd ed., Marcel Dekker, New York. 2002.
- Leung W.S., Chan C.C. A new design approach for axial-field electrical machine, IEEE Trans. PAS-99(4): pp. 1679-1685. 1980.
- Miti G.K., Renfrew A.C. Field weakening performance of the TORUS motor with rectangular current excitation, Int. Conf. on Electr. Machines IECM'98, Istanbul, vol. 1, pp. 630-633. 1998.
- Campbell P. Principle of a PM axial field DC machine, Proceedings of IEE, vol. 121, no. 1, pp. 1489-1494. 1974.
- Chan C.C. Axial-field electrical machines with yokeless armature core. PhD Thesis, University of Hong Kong. 1982.
- Amaratunga G.A.J., Acarnley P.P., McLaren P.G. Optimum magnetic circuit configurations for PM aerospace generators, IEEE Trans on AES, Vol. 21(2): pp. 230-255. 1985.
- Huang S., Luo J., Leonardi F., Lipo T.A. A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations, IEEE Trans. EC-14(2): pp. 185-192. 1999.
- Zhang Z., Profumo F., Tonconi A. Axial flux versus radial flux permanent magnet motors, Electromotion, vol. 3, pp. 134-140. 1996.
- Sitapati K., Krishnan R. Performance comparisons of radial and axial field permanent magnet brushless machines, IEEE Trans. IA-37(5): pp. 1219-1226. 2001.
- Gieras J.F., Gieras I.A. Performance analysis of a coreless permanent magnet brushless motor, IEEE 37th IAS Meeting, Pittsburgh, PA, U.S.A. 2002.
- Caricchi F., Crescimbin F., Fedeli E., Noia G. Design and construction of a wheel-directly-coupled axial-flux PM motor prototype for EVs, IEEE-IAS Annual Meeting, IAS-29, part 1, pp. 254-261. 1994.
- Heller B. and Hamata V. *Vysshiyе garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Harmonic Field Effect in Induction Machines]. Moscow: Energiya, 1981. 352 p. (In Russian)
- Chalmers B.J., Hamed S.A., Baines G.D. Parameters and performance of a high-field permanent magnet synchronous motor for variable-frequency operation, Proc. IEE Pt B 132(3): pp. 117-124. 1985.
- Lukaniszyn M., Wrobel R., Mendrela A., Drzewoski R. Towards optimization of the disc-type brushless d.c. motor by changing the stator core structure, Int. Conf. on Electr. Machines IECM'2000, vol. 3, Espoo, Finland, pp. 1357-1360. 2000.
- Lukaniszyn M., Mendrela E., Jagiello M., Wrobel R. Integral parameters of a disc-type motor with axial stator flux, Zesz. Nauk.Polit. Slaskiej, vol. 200, Elektryka, no. 177, pp. 255-262. 2002.
- Mendrela E., Lukaniszyn M., Macek-Kaminska K. Electronically commutated d.c. brushless disc motors (in Polish). Warsaw: Gnome. 2002.
- Caricchi F., Crescimbin F., Fedeli E., Noia G. Design and construction of a wheel-directly-coupled axial-flux PM motor prototype for EVs, IEEE-IAS Annual Meeting, IAS-29, part 1, pp. 254-261. 1994.
- Evans P.D., Easham J.F. Slot-less alternator with ac-side excitation, Proc. of IEE, vol. 130, no. 6, pp. 399-406. 1983.
- Hrabovcova V., Brslica V. Disk synchronous machines with permanent magnets – electric and thermal equivalent circuits, Electr. Drives Symp., Capri, Italy, pp. 163-169. 1990.
- Klug L. Axial field a.c. servomotor, Electr. Drives and Power Electronics Symp. EDPE'90, Kosice, Slovakia, pp. 154-159. 1990.
- Klug L., Guba R. Disc rotor a.c. servo motor drive, Electr. Drives and Power Electronics Symp. EDPE'92, Kosice, Slovakia, pp. 341-344. 1992.
- Gair S., Eastham J.F., Profumo F. Permanent magnet brushless d.c. drives for electric vehicles, Int. Aeagean Conf. on Electr. Machines and Power Electronics ACEMP'95, Turkey, pp. 638-643. 1995.

25. Spooner E., Chalmers B., El-Missiry M.M. A compact brushless d.c. machine, Electr. Drives Symp. EDS'90, Capri, Italy, pp. 239-243. 1990.
26. Zhang Z., Profumo F., Tenconi A. Axial flux interior PM synchronous motors for electric vehicle drives, Symp. on Power Electronics, Electr. Drives, Advanced Electr. Motors SPEEDAM'94, Taormina, Italy, pp. 323-328. 1994.
27. Wang R., Kamper M.J. Evaluation of eddy current losses in axial flux permanent magnet (AFP) machine with an ironless stator, IEEE 37th IAS Meeting, Pittsburgh, PA, U.S.A 2002.
28. Afonin A.A. Disk electric machines with rotating magnetization vectors for permanent magnets. Dop. NAS of Ukraine, 2004, no. 2, pp. 94-101.
29. Afonin A.A., Grebenikov V.V. The structure of electric machines of disk type. Prtsi IED NASU, 2002, no. 1, pp. 56-70.
30. Ahmed A.B., de Cachan L.E. Comparison of two multidisc configurations of PM synchronous machines using an elementary approach, Int. Conf. on Electr. Machines IECM'94, vol. 1, Paris, France, pp. 175-180. 1994.
31. Chillet C., Brissonneau P., Yonnet J.P. Development of a water cooled permanent magnet synchronous machine. Int. Conf. on Synchronous Machines SM100, vol 3, Zürich, Switzerland, pp. 1094-1097. 1991.
32. Eastham, J.F., Profumo, F., Tenconi, A., Hill-Cottingham R., Coles, P., Gianolio, G. Novel axial flux machine for aircraft drive: design and modeling, IEEE Trans. MAG-38(5): pp. 3003-3005. 2002.
33. El-Hasan T.S., Luk, P.C.K., Bhinder, F.S., Ebaid M.S. Modular design of high-speed permanent-magnet axial-flux generators. IEEE Trans. MAG-36(5): pp. 3558-3561. 2000.
34. ULEV-TAP URL: <http://www.ulev-tap.org>
35. Acarnley P.P., Mecrow B.C., Burdess J.S., Fawcett J.N., Kelly J.G., Dickinson P.G. Design principles for a flywheel energy store for road vehicles, IEEE Trans. IA-32(6): pp. 1402-1408. 1996.
36. Patterson D., Spee R. The design and development of an axial flux permanent magnet brushless d.c. motor for wheel drive in a solar powered vehicle, IEEE Trans. IA-31(5): pp. 1054-1061. 1995.
37. Ramsden V.S., Mecrow B.C., Lovatt H.C. Design of an in wheel motor for a solar-powered electric vehicle, Proc. of EMD'97, pp. 192-197. 1997.
38. Cascio A.M. Modeling, analysis and testing of orthotropic stator structures, Naval Symp. on Electr. Machines, Newport, RI, USA, pp. 91-99. 1997.
39. Coilgun research spawns mighty motors and more. Machine Design 9: pp. 24-25, 1993.
40. Mongeau P. High torque/high power density permanent magnet motors, Naval Symp. on Electr. Machines, Newport, RI, USA, pp. 9-16. 1997.
41. Caricchi F., Crescimbini F., Santini E. Basic principle and design criteria of axial-flux PM machines having counter rotating rotors, IEEE Trans. IA-31(5): pp. 1062-1068. 1995.
42. Top drives URL: <http://www.tescocorp.com/ProductSales/TopDrives/default.aspx>
43. Hakala H. Integration of motor and hoisting machine changes the elevator business, Int. Conf. on Electr. Machines IECM'2000, Vol 3, Finland, pp. 1242-1245. 2000.
44. Kleen S., Ehrfeld W., Michel F., Nienhaus M., Stolting H.D. Penny-motor: A family of novel ultraflat electromagnetic micromotors, Int. Conf. Actuator'2000, Bremen, Germany, pp. 193-196. 2000.
45. Jang G.H., Chang J.H. Development of an axial-gap spindle motor for computer hard disk drives using PCB winding and dual air gaps, IEEE Trans. MAG-38(5): pp. 3297-3299. 2002.
46. Mavilor's motors are specially suited for high response servo drives. URL: <http://www.mavilor.es>
47. GenSmart, High-efficiency, high power density, variable speed electric motors, generators and drive systems URL: <http://www.lightengineering.com>
48. e-TORQ Motors URL: <http://www.bodine-electric.com/etorq/>
49. Kessinger R.L. Introduction to SEMA motor technology. Kinetic Art and Technology, Greenville, IN, U.S.A. 2002.
50. Electric machines for propulsion URL: <http://www.launchpnt.com>
51. Kessinger R.L., Robinson S. SEMA-based permanent magnet motors for high-torque, high-performance, Naval Symp. on Electr. Machines, U.S.A., pp. 151-155. 1997.
52. Kessinger R.L., Stahura P.A., Receveur P.E., Dockstader K.D. Interlocking segmented coil array. U.S. Patent No. 5, 744, 896. 1998.
53. El-Hasan T., Luk P.C.K. Magnet topology optimization to reduce harmonics in high-speed axial flux generators, IEEE Trans. MAG-39(5): pp. 3340-3342. 2003.
54. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare-earth cobalt material, Nuclear Instruments and Methods, Vol. 169, pp. 1-10. 1980.
55. Halbach K. Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets, Nuclear Instruments and Methods, vol. 187, pp. 109-117. 1981.
56. Halbach K. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings, J. Appl. Physics, vol. 57, pp. 3605-3608. 1985.
57. Sadeghirad M. Designing a coreless high-speed axial flux PM generator for microturbines // Journal of computer & robotics no. 1, pp. 63-67. 2011.

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф. Обзор конструкций дисковых электромеханических преобразователей энергии для различных областей применения // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 68-79. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-68-79](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-68-79)

Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F. Overview of Disk Designs of Electromechanical Energy Converters for Various Applications. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 68-79. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-68-79](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-68-79)