

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ С ПРЕДЕЛЬНЫМИ УДЕЛЬНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ И СИЛОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Долгов Л.В., ООО Полимагнит Северо-Запад (группа компаний АМТ&С),

Аннотация

В работе рассказывается о новых подходах и опыте разработки и производства синхронных электроприводов с радиальным магнитным потоком, позволяющих достигать величины удельной мощности до 6-8 кВт/кг полной массы (в зависимости от частоты вращения), линейных электроприводов с удельной силой до 2800 Н/кг. Излагается подход по комплексному проектированию электроприводов, включая механические устройства (шарики-винтовые пары (ШВП), ролико-винтовые пары (РВП), редукторы и т.д.) и систем управления, позволяющий оптимизировать массо-габаритные и удельные параметры электромеханических устройств различного назначения. Приводятся конкретные примеры разработок. Обосновывается необходимость разработки отечественной силовой элементной базы для создания новых образцов техники.

Сегодня ни у кого не вызывает сомнений, что по удельным характеристикам среди различных типов электрических машин фаворитом является электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов. Преимущество является настолько явным, что во многих случаях приводит к необоснованному применению прямого привода, попыткам решить сложную техническую задачу, что называется «одним ударом», сделав ставку на безредукторный привод, на электродвигатель с особо сильными магнитами. Покажем, что применение электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов в единой компоновке с механической передачей, при определенных условиях, приводит к существенному увеличению удельных характеристик привода, включая силовые ключи, источник питания и систему охлаждения, которая в случае предельных энергетических характеристик может являться основным ограничивающим фактором.

Основными и перспективными областями применения электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов с предельными удельными характеристиками являются:

- исполнительные приводы для высокоточных приборов наведения, слежения и контроля
- экстремальная робототехника, включая исполнительные механизмы БПЛА, приводы для КА и военной техники.
- электрический, включая гибридный, наземный транспорт, маршевые двигатели БПЛА вертолетного типа и автожиров.

Для исполнительных устройств высокоточных приборов наведения, слежения и контроля бесспорным является

применение прямого безредукторного привода как с точки зрения обеспечения высокого качества управления, так и удовлетворения требований по компактности и удельному весу. Следует, однако, отметить, что для большинства приборных электродвигателей характерны условия работы в ненапряженном тепловом режиме, что в свою очередь исключает требования по теплоотводу в условиях ограничений по габаритам и весу всей системы силового привода. Примерами приборных приводов могут служить электродвигатели для гироскопов. Для маломощных электрических машин на постоянных магнитах удельные значения составляют 200-500 Вт/кг.

Для экстремальной робототехники характерно напротив применение редукторных приводов с высокими максимальными удельными моментами. Здесь основным элементом, определяющим массогабаритные характеристики привода является редуктор или механическая передача. К.п.д так же не является определяющим фактором, поскольку развиваемые предельные моменты или силы являются кратковременными – перекладка рулей, преодоление препятствия и т.д. Главное для таких устройств, это выдержать предельные нагрузки, а дальше холостой или малонагруженное перемещение самого себя. Тепловое напряжение, как и для приборных электродвигателей, практически отсутствует. Следует отметить, что именно конструкция синхронной электрической машины с радиальным магнитным потоком позволяет выполнять компоновки с очень высокими силовыми характеристиками. Такая машина представляет тор и имеет внутреннее отверстие достаточное для размещения в нем датчиков или исполнительных механизмов, особенно линейных механических передач таких как РВП или ШВП. Примерами таких передач могут служить привода показанные на рисунке 1 и 2.

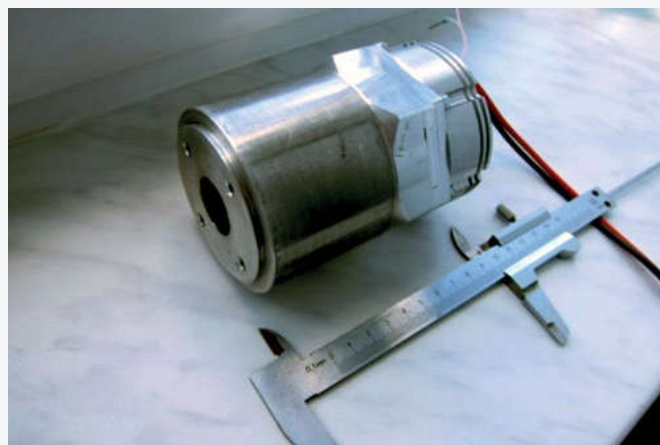


Рисунок 1. Привод с обращенной РВП

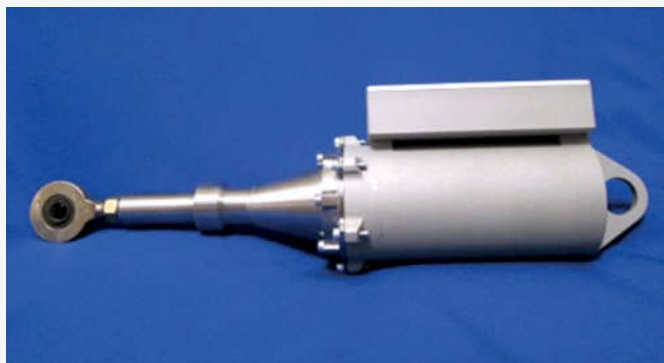


Рис. 2. Привод с ШВП



Рис. 3. Обращенная - инвертированная РВП в составе электроцилиндра фирмы Exlar

Удельные характеристики по максимальному усилию для ШВП составили 1000Н/кг при максимальном усилии 1500Н, для РВП – 2800Н/кг при максимальном усилии 5000Н. В обоих случаях блоки управления входят в состав привода.

Показательным также является и компоновочное решение одной из ведущих фирм в области электропривода на постоянных магнитах фирмы Exlar выпускающей электроцилиндры с инвертированной РВП, представленные на рисунке 3.

При этом удельные характеристики по максимальному усилию составляют от 1000Н/кг для приводов с максимальным усилием в несколько тон, до 5000Н/кг для усилий до 10 тон и могут достигать 10000Н/кг для приводов в десятки тон.

Для электромеханических приводов вращательного типа на базе электродвигателя на постоянных магнитах характерно применение волновых редукторов фирмы Harmonic Drive или их аналогов. Удельные характеристики волнового редуктора(как отдельного узла) являются на сегодня наивысшими. Тем не менее, при установке волновой передачи на опоры ее преимущество резко падает, уступая при этом передачам с промежуточными телами качения или планетарным передачам, построенным по схеме k-h-v. Примером привода построенного на базе электродвигателя на постоянных магнитах и планетарной передачи k-h-v может служить привод, представленный на рисунке 4.



Рис. 4. Привод кресла инвалидной коляски-робота.

При габарите 120x115 мм максимальный момент на выходном валу составил 1200 Нм. При этом в состав привода входят два датчика положения и электромагнитный тормоз. Передаточное отношение редуктора 520. Вес 7,3 кг.

Максимальные удельные параметры приводов для робототехнике достигают значений в 120Нм/кг. Достигнутые высокие удельные параметры позволяют создать силовую электромеханическую элементную базу не только для классических областей применения, но и приступить к проектированию еще недавно казавшихся невероятными экзоскелетов с грузоподъемностью в несколько тон, шагающих роботов с соотношением полезной нагрузки к массе шагающего шасси 1:1 и скоростью движения по пересеченной местности до 60 км/час роботов, а также роботизированных комплексов, работающих в экстремальных условиях от арктического шельфа до условий венерианской атмосферы. Учитывая стремительный прогресс в области искусственного интеллекта, вполне реальной выглядит задача исключения необходимости присутствия человека в экстремальных условиях: ликвидация последствий атомных аварий, пожаров, боевых действиях т.д.

Если в области беспилотной авиации наметилось приоритетное направление дальнейшего развития – это электрический автожир – машина соединяющая в себе преимущества вертолета и самолета, то в области наземных средств передвижения такой определенности нет. По мнению авторов, таким приоритетным направлением станут шагающие роботы. Именно они сочетают в себе повышенную проходимость, маневренность, малозаметность, способность использовать перцепторы (ноги) одновременно как для передвижения, так и для выполнения операций заменяющих руку человека. Шагающими машинами сегодня занимаются практически все ведущие мировые концерны, правда, в основном сосредоточив усилия на копировании человека, что с точки зрения авторов является бесперспективным. Роботы не должны быть копиями человека, роботы должны быть сильнее, быстрее и адаптивнее человека и не только в экстремальных условиях.

Примерами поисковых работ в области шагающих роботов может служить робот «Атлант» NASA (рисунок 6) или проект робота-полицейского фирмы C.R.A.B. (рисунок 7).



Рис. 6. Шагающее шасси «Атлант» (NASA)



Рис. 7. Проект робота-полицейского фирмы C.R.A.V.

Наиболее сложные проблемы на сегодняшний день возникают при попытках решить задачи создания мощных (до 100 кВт) электрических исполнительных механизмов при жестких ограничениях по массе и габаритам, а учитывая необходимость теплоотвода не только от корпуса электродвигателя, но и от силовых ключей контроллера, что требует получения высокого к.п.д. как на электродвигателе, так и механической передаче. Решение подобных проблем на сегодня невозможно без применения системного подхода, основанного на объединении узких специалистов в творческий коллектив, направленный на решение не узкоспециальных, а общих задач.

Одной из таких актуальных задач является задача создания поддрессоренного мотор-колеса. Разработки мотор-колес для легкового автомобиля ведут такие компании как Siemens, Mercedes-Benz, Protean Electric, Michelin и др. Наиболее характерные решения этих компаний представлены на рисунках 7-9. Попытки найти решение, размещающий электродвигатель непосредственно в обод колеса (рисунки 7 и 8), ведут не только к его значительному утяжелению, что отрицательно сказывается на динамике автомобиля, но и приводят к существенному удорожанию. Удачная попытка компании Michelin, разместить высокооборотный компактный привод с редуктором, потребовала установки в обод избыточно сложного передаточного и демпфирующего механизмов, это привело к росту стоимости колеса, но так и не решило проблему избыточной поддрессоренной массы.

На рисунке 11 представлен макет поддрессоренного мотор-колеса, выполненного на базе электродвигателя на постоянных магнитах с параметрами:

- Номинальная мощность – 25 кВт
- Максимальная мощность – 50 кВт
- Номинальный момент – 40 Нм
- Максимальный момент – 100 Нм

Удельная мощность:

- По номинальному моменту – 3 кВт/кг
- По максимальному моменту – 6,25 кВт/кг
- Редуктор выбран исходя из обеспечения максимального свободного хода в ободу R18:
- Передаточное число – 4,8
- Максимальный момент – 480 Нм

Максимальный момент на четырех колесах составит 1920 Нм, что обеспечивает создание на базе четырех колес автомобиля весом до 1900 кг.

Системный подход к решению поставленной задачи привел к созданию не только привода с высокими удельными характеристиками (удельная мощность при максимальном моменте привода в целом составила 4 кВт/кг), но и позволил массу привода присоединить к корпусу автомобиля, а не к ободу колеса. При этом получена дополнительная возможность стабилизации автомобиля на четырех колесах не только в статике, но и в динамике. Следует также особо отметить, что одновременно с решением сложной кинематической задачи была проведена оптимизация электродвигателя на постоянных магнитах по критерию к.п.д. Расчетный к.п.д. электродвига-

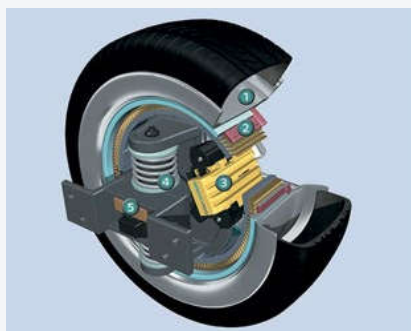


Рис. 8. МК компании Siemens



Рис. 9. МК компании Protean Electric



Рис. 10. МК компании Michelin



Рис. 11. Макет поддрессоренного МК

теля для МК составил не менее 96,5% при температуре обмоток 100 С.

При решении задач силового привода с удельными параметрами выше 3 кВт/кг актуальными являются:

- достижение максимально возможного к.п.д. как электродвигателя, так и редуктора;
- обеспечение высокоскоростной коммутации при токах выше 200 А;
- эффективный теплоотвод с силовых транзисторов.

Выводы

Таким образом, созданный конструкторами группы АМТ&С задел в области теоретических исследований и практический опыт конструкторских разработок силовых электромеханических приводов для космической, авиационной и транспортной отрасли позволяет создавать изделия не уступающие мировому уровню развития техники. Достигнутые удельные параметры созданных приводов составляют:

- для линейных приводов с ШВП – 1000 Н/кг в диапазоне усилий в несколько сот килограмм
- для линейных приводов с РВП – 2800 Н/кг в диапазоне усилий до 1000 кг
- для приводов вращательного типа – 120 Нм/кг в диапазоне моментов до 2000 Нм
- для приводов транспортных средств и силовых агрегатов БПЛА мощностью до 100 кВт – 6 кВт/кг

Проведенные группой АМТ&С работы по созданию действующих макетов и прототипов показали, что существующая актуальнейшая задача создания отечественной элементной базы приводов для силовых роботов и робототехнических комплексов, с технической точки зрения, может быть успешно решена. Формирование в России собственной элементной базы в области силового электропривода открывает новые возможности в области проектирования для КБ и проектных организаций по созданию новых типов изделий включая шагающих роботов или аватаров.

Системный подход авторов к проблеме мотор-колеса позволил решить одну из самых технически сложных задач в области электропривода. Разработанный принцип поддрессирования в сочетании с синхронным электрическим двигателем с радиальным магнитным потоком с высокими удельными характеристиками позволил не только решить проблему мотор-колеса, но и расширить функционал автомобиля сделав возможным разворот на месте или активное демпфирование подвески автомобиля во время движения. С МК автомобиль превращается в четыре колеса связанных с источником энергии и бортовым компьютером только электрическими проводами. А при наличии навигационной системы, системы связи, управления и контроля это уже не автомобиль в привычном нам понимании – это электромеханический робототехнический комплекс.