

УДК 621.313.13

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

¹Гаврилова И.В., ²Черкасов К.В., ¹Чистякова Н.С.

¹ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, e-mail: IrGa3009@gmail.com;

²ПАО НПО «Андроидная техника», Магнитогорск, e-mail: kir.cherkasoff@gmail.com

Проведен исторический анализ развития электродвигателей, приводится их общая классификация, в основу которой положены особенности конструкции устройств. Обосновано применение видов электродвигателей для построения антропоморфных робототехнических систем. Особенности конструкции последних позволяют применять только коллекторные двигатели с независимым возбуждением от электромагнитов или постоянных магнитов, серводвигатели и бесколлекторные внутрироторные и внешнероторные двигатели. Именно эти классы электродвигателей энергоэффективны, могут иметь небольшие размеры, обеспечивают равномерность движения и выдерживать нагрузки, которым подвергаются узлы антропоморфных робототехнических систем. Отмечено, что в Российской Федерации производство таких классов двигателей отсутствует, что выступает важным фактором, сдерживающим развитие промышленной робототехники. Сделан вывод о необходимости производства отечественных электродвигателей небольшого размера как одного из перспективных направлений импортозамещения.

Ключевые слова: электродвигатель, робот, антропоморфная робототехническая система, серводвигатель, импортозамещение

ELECTRIC MOTORS FOR CONSTRUCTION OF ANTHROPOMORPHOUS ROBOT SYSTEMS

¹Gavrilova I.V., ²Cherkasov K.V., ¹Chistyakova N.S.

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, e-mail: IrGa3009@gmail.com;

²Android Technics, Magnitogorsk, e-mail: kir.cherkasoff@gmail.com

We have done the historical analysis of the development of electric motors, their general classification which basis features of a design of devices are is given. Application of types of electric motors for creation of anthropomorphous robotic systems is proved. Features of a design of the last allow to use only collector engines with independent excitement from electromagnets or permanent magnets, servomotors and collectorless intra rotor and externally rotor engines. These classes of electric motors are energy efficient, can have the small sizes, provide uniformity of movement and to maintain loadings to which nodes of anthropomorphous robotic systems are exposed. It is noted that in the Russian Federation production of such classes of engines is absent that acts as the important factor constraining development of industrial robotics. The conclusion is drawn on need of production of domestic electric motors of the small size as one of the perspective directions of import substitution

Keywords: electric motor, robot, anthropomorphous robotic system, servomotor, import substitution

На протяжении всего своего существования человечество стремится создать искусственное существо по своему образу и подобию. И, хотя первые удачные попытки были предприняты уже в XXIII в., наиболее весомый вклад в развитие методов и технологий создания антропоморфных систем внесло развитие робототехники в начале XXI в. Именно в этот период созданная в XIX в. программно-аппаратная база сняла ряд конструктивных ограничений. Основными элементами конструкции антропоморфной (человекоподобной) робототехнической системы выступают электродвигатели (ЭД), которые подбираются в зависимости от решаемых ими задач [1, 3].

Благодаря изобретению ЭД произошла автоматизация многих процессов во всех сферах жизнедеятельности человека, которая позволила шагнуть на новый уровень производства, развить технические предметные области. ЭД широко применяются

во всех областях жизнедеятельности, с их помощью механизмируются технологические процессы, облегчается труд человека, уменьшается количество физической силы, необходимой для получения желаемого результата, жизнь в повседневных условиях становится комфортнее. Об электромоторах становитесь заговорили еще в восемнадцатом веке, однако из-за совершенства технологической базы ЭД существовали только в виде чертежей. Но позднее, когда появилось производство электродвигателей, полностью изменилась и промышленность. Тяжелый ручной труд на производственных предприятиях отошел в прошлое [3,6].

В доиндустриальной истории развития ЭД выделяются следующие этапы (см. рис. 1).

I. Начальный (исследовательский) этап (1821–1834 гг.): созданы приборы для демонстрации непрерывного преобразования электрической энергии в механическую; в 1821 г. М.Фарадей экспериментально до-

казал, что электрический ток вызывает вращение проводника и магнита относительно друг друга. Опыты Фарадея показали принципиальную возможность построения ЭД.

Обмотка электромагнитов включалась последовательно с обмоткой якоря (т.е. электромашина имела последовательное возбуждение). Габариты двигателя были



Рис. 1. Основные вехи развития электродвигателей

II. Первый конструкторский этап: (1834–1860 гг.): созданы конструкции с вращательным движением явнополюсного якоря. В 1834 г. Б.С. Якоби создал первый в мире ЭД постоянного тока, в котором реализован принцип непосредственного вращения подвижной части двигателя. Спустя четыре года этот двигатель (мощностью 0,5 кВт) был испытан для приведения в движение лодки с находящимися в ней людьми. Испытания различных конструкций ЭД позволили сделать следующие важные выводы: 1) использование ЭД напрямую зависит от стоимости генератор, чем гальванические элементы; 2) ЭД должны иметь малые габариты, большую мощность и больший коэффициент полезного действия (КПД).

III. Второй конструкторский этап (1860–1887 гг.): связан с разработкой конструкций с кольцевым неявнополюсным якорем и практически постоянным вращающим моментом. Ярким представителем конструкций этого этапа выступает ЭД А. Пачинотти (1860 г.), состоящий из неявнополюсного якоря кольцеобразной формы, вращающегося в магнитном поле электромагнитов. Подвод тока осуществлялся ро-

невелики, он имел практически постоянный вращающий момент.

Основные принципы работы электродвигателя были разработаны именно в приведенный промежуток времени. Тем не менее, в современном мире продолжают совершенствоваться различные элементы конструкций электродвигателей, но компании-разработчики стараются не разглашать конструктивные особенности своих ЭД, поскольку эти сведения являются коммерческой тайной.

Сегодня ЭД можно условно разделить по принципу возникновения вращающего момента на две основные большие группы: гистерезисные и магнитоэлектрические.

У двигателей первой группы вращающий момент создается вследствие гистерезиса (запаздывания) при перемагничивании ротора. Алгоритмы управления такими ЭД должны учитывать, что первоначальное состояние ротора зависит от предыдущей работы, что усложняет их разработку. Данные ЭД не получили распространения в промышленности.

Магнитоэлектрические двигатели по типу потребляемой энергии подразделяются на три большие группы: двигатели

постоянного и переменного тока и универсальные двигатели, которые могут питаться обоими видами тока.

Двигатель постоянного тока – ЭД, питание которого осуществляется постоянным током; по наличию щёточно-коллекторного узла подразделяется на коллекторные и бесколлекторные двигатели.

По типу возбуждения коллекторные двигатели можно разделить на двигатели с независимым возбуждением от электромагнитов и постоянных магнитов и двигатели с самовозбуждением.

Двигатели с самовозбуждением в свою очередь делятся на двигатели с параллельным возбуждением (обмотка якоря включается параллельно обмотке возбуждения), двигатели последовательного возбуждения (обмотка якоря включается последовательно обмотке возбуждения) и двигатели смешанного возбуждения.

Бесколлекторные (вентильные) двигатели – ЭД, выполненные в виде замкнутой системы с использованием датчика положения ротора, системы управления (преобразователя координат) и силового полупроводникового преобразователя (инвертора). Принцип работы данных двигателей аналогичен принципу работы синхронных двигателей. В свою очередь, бесколлекторные ЭД делятся по конструктивному исполнению ротора на внутрироторные и внешне-роторные.

Двигатель переменного тока – ЭД, питание которого осуществляется переменным током. По принципу работы эти двигатели разделяются на синхронные (ротор вращается со скоростью вращения магнитного поля в статоре) и асинхронные двигатели (поле вращается быстрее ротора). Виды синхронных ЭД представлены на рис. 2.

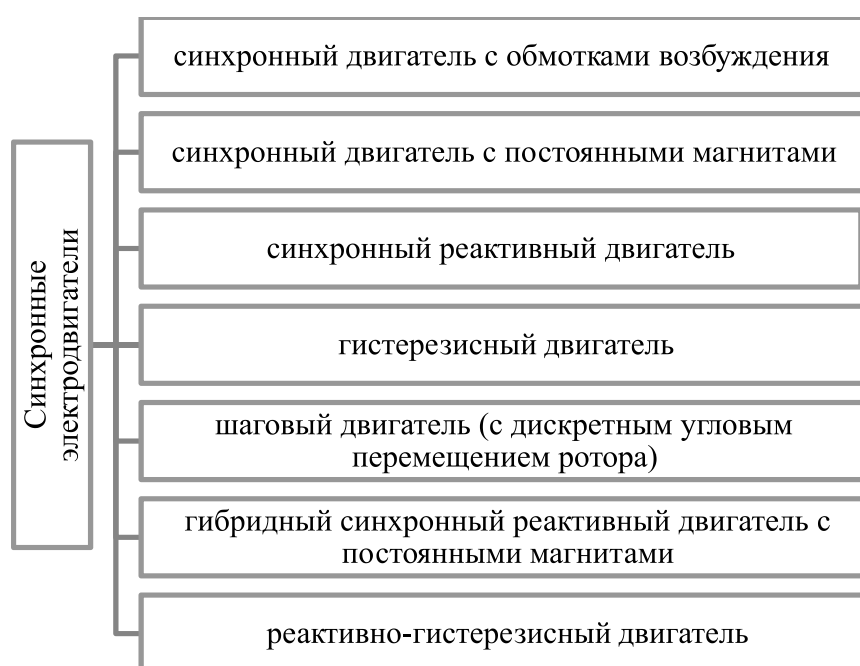


Рис. 2. Виды синхронных ЭД

Синхронные ЭД с обмотками возбуждения двигателя обычно используются при больших мощностях (от сотен киловатт и выше).

Асинхронный ЭД – ЭД переменного тока, в котором частота вращения ротора отличается от частоты вращающего магнитного поля, создаваемого питающим напряжением. Эти двигатели наиболее распространены в настоящее время.

По количеству фаз двигателя переменного тока подразделяются на: однофазные (запускаются вручную, или имеют пусковую обмотку или фазосдвигающую цепь), двухфазные, трёхфазные и многофазные.

Универсальный коллекторный электродвигатель – коллекторный ЭД, который может работать и на постоянном, и на переменном токе. Применяется в бытовых аппаратах, электроинструментах.

Синхронный ЭД возвратно-поступательного движения имеет подвижную часть двигателя, представляющую собой постоянные магниты, закреплённые на штоке. Через неподвижные обмотки пропускается переменный ток и постоянные магниты под действием магнитного поля, создаваемого обмотками, перемещают шток возвратно-поступательным образом.

Для того чтобы создать момент на валу двигателя, необходимо взаимодействие магнитного поля и тока. На роторе размещается обмотка, сегменты которой поочередно подключаются к выводам двигателя при помощи щеток и коллектора.

При подаче напряжения по сегментам обмотки ротора начинает протекать ток.

Взаимодействие с магнитным полем постоянного магнита расположенного на статоре, приводит к возникновению момента, приложенного к валу двигателя. Под действием этого процесса постоянные магниты перемещают шток.

В основе работы бесколлекторного двигателя лежит синхронный принцип действия (синхронное изменение ЭДС и скорости). Ротор (вращающаяся часть) – это постоянный магнит, закреплённый на двухконцевом вале. Статор (неподвижная часть) включает корпус, изготовленный из стали или алюминия, и обмотку двигателя (три фазы с тремя обмотками, объединёнными либо в «звезду», либо в «треугольник»). Когда к обмоткам приложено напряжение, сдвинутое друг относительно друга на 120 градусов, в статоре генерируется вращающееся поле. В связи с тем, что ротор является активным элементом, магнит всегда стремится занять своё положение по линии магнитного поля. Таким образом, переключая линии магнитного поля, получим вращение ротора. На вале двигателя стоит датчик положения ротора (датчик Холла), с ним по принципу обратной связи соединён коммутатор (любой контроллер или сервоусилитель), управляющий ключами силового каскада усиления мощности (транзисторами MOSFET), к которым подключены обмотки двигателя. В зависимости от угла поворота коммутатор переключает транзисторы. Так происходит последовательное переключение обмоток, дающее вращение ротора двигателя. Коммутатор и датчик Холла – это аналог щеточно-коллекторного узла DC-мотора.

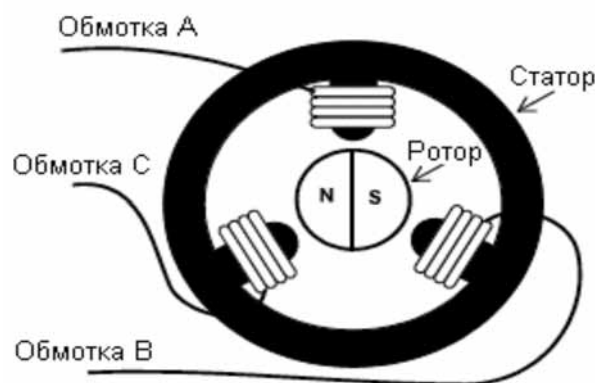


Рис. 3. Устройство бесколлекторного ЭД

Достоинства бесколлекторного двигателя в сравнении с коллекторным исполнением:

- высокая надежность работы (нет щеточно-коллекторного узла, следовательно, нет искрения и выработки щеток на больших скоростях вращения);
- меньшее трение дает линейность регулировочной характеристики и меньший уровень электромагнитного шума;
- применение в конструкции мотора балансировочных колец, которые обеспечивают стабильность работы при больших скоростях вращения (до 40'000 мин⁻¹).

Недостатки бесколлекторного двигателя:

- на очень низких скоростях вращения могут появляться пульсации, вызванные дискретным переключением обмоток двигателя;
- для обеспечения большей точности и плавности работы при управлении на очень высоких скоростях нужно применять энкодер с высокой разрешающей способностью, который сможет дополнительно производить около 2000 измерений;
- большее количество проводов от мотора: всего 8 (3 – обмотки мотора, 3 – ДПР (датчик Холла), 1 – заземление, 1 – питание ДПР);
- для электронного переключения обмоток ротора необходим блок управления.

Основные преимущества электронно-коммутируемых (бесконтактных) электродвигателей постоянного тока:

- высокий КПД;
- низкое энергопотребление;
- минимальные тепловые потери;
- невысокий уровень электромагнитного поля;
- надежность эксплуатации, в том числе на высоких скоростях;
- возможность эффективного управления скоростью вращения двигателя;
- незначительный вес и малые габариты.

Обычно серводвигатели представляют собой трехполюсные коллекторные двигатели, в которых ротор с обмотками вращается внутри магнитов, однако по сути это коллекторный ЭД с независимым возбуждением от электромагнитов, правда, в робототехнике он отличается небольшими габаритами, и обычно, малой мощностью. Свое название сервоприводы получили от англ. «to serve» – служить. Его основными характеристиками выступают динамика двигателя, равномерность движения, энергоэффективность. Сервоприводы с мотором, предназначенные для приведения в движение устройств управления через поворот выходного вала, применяются для открытия и закрытия клапанов, в переключателях.

На сегодняшний день наиболее распространенными типами электродвигателей

в антропоморфных роботизированных системах являются коллекторные и бесколлекторные двигатели постоянного тока, а именно:

- коллекторные двигатели с независимым возбуждением от электромагнитов – используются в антропоморфных роботах в средних и крупных узлах, несущих довольно большой вес, таких как подъем и сгибатели верхних педипуляторов (плечи и предплечья);
- коллекторные двигатели с независимым возбуждением от постоянных магнитов – находят применение в средних узлах, но уже не обязательно несущих такой большой вес, это могут быть предплечья, кисти или поворот руки, к ним относятся и серводвигатели;

• серводвигатели широко применяются в малых узлах, таких как шея, пальцы и кисти робота;

• бесколлекторные внутривиточные двигатели применяются в крупных узлах, со средней нагрузкой, это может быть поворот и вращение плеча, поворот ноги в тазе и т. п.;

• бесколлекторные внешневиточные используются в крупных узлах, несущих основной вес роботизированной системы, таких как стопы, колени и таз. Момент в таких местах, в зависимости от конструкции, может достигать 70 ньютонов на квадратный метр.

В России производство электродвигателей сосредоточено в основном на крупных промышленных электродвигателях переменного тока, применить которые в создании антропоморфного робота размером с человека невозможно. Малогабаритные ЭД с большим стартовым моментом можно найти только у зарубежных производителей. Так, например, магнитогорская «Андроидная техника» в узлах антропоморфных роботов применяла ЭД производства австрийской компании Maxon Motor, которая имеет широкую сеть дистрибьюторов по всему миру. [2, 4, 5] Такие ЭД высокоэффективны, обладают небольшими габаритами и легкодоступны, несмотря на достаточно высокую цену. Кроме этого компания предлагает готовые комплекты, включающие совместимые ЭД, редуктор и энкодер.

Альтернативой продукции Maxon выступают немецкие ЭД Robodrive, в которых реализован принцип «узел и есть двигатель» – двигатель вклеивается в корпус робота, без различных механизмов передачи, таких как вал, ремень и т. п., что позволяет существенно экономить пространство и освободить дополнительное место для свободного хода узла.

Таким образом, основной проблемой применения ЭД в робототехнике является

отсутствие их производства в России – все применяемые модели принадлежат заграничным производителям, таким, как австрийская Maxon Motor или немецкая RoboDrive. Даже простые по своему устройству серводвигатели в основном производятся в Китае, в России их производство также отсутствует. Создание линии производства малогабаритных и высокопроизводительных электродвигателей, как коллекторных, так и бесколлекторных существенно упростило бы жизнь российским компаниям, занимающимся робототехникой.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 8373–2014 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200118297> (дата обращения: 13.12.16).
2. Комбинированные системы управления робототехническими комплексами на основе элементов сенсорики с обратными связями для обеспечения возможности замены человека при работе в условиях чрезвычайной ситуации / В.Б. Сычков, А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, А.Ф. Пермяков, Е.В. Попова // Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий XX Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций / Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2015. – С. 585–587.
3. Масленникова О.Е. Основы искусственного интеллекта / О.Е. Масленникова О.Е., И.В. Гаврилова И.В. – М.: ФЛИНТА, 2013. – 123 с.
4. Моделирование бизнес-процесса «Изготовление печатных плат и программного обеспечения антропоморфных роботизированных систем» / К.В. Черкасов [и др.] – Современная техника и технологии. – 2016. – № 1 (53). – С. 4–8.
5. Основы построения специальных роботов для работы на космических аппаратах / В.Б. Сычков, А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, А.Ф. Пермяков, Е.В. Попова // Робототехника и искусственный интеллект Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 2016. – С. 48–53.
6. Терещенкова Ю.В., Масленникова О.Е. Элективный курс «Basic для андроидных роботов» / Ю.В. Терещенкова, О.Е. Масленникова. – Магнитогорск: МаГУ, 2009. – 116 с.