

УДК 621.313.333 622.625.28

## Перспективы синхронных тяговых двигателей в приводе рудничных электровозов

Рассмотрена концепция разработки безредукторного тягового электропривода рудничных электровозов на основе применения регулируемого синхронного двигателя с постоянными магнитами.

**Ключевые слова:** рудничный электровоз, безредукторный привод, синхронный тяговый электродвигатель, постоянные магниты.

**Контактная информация:** maneb\_doneck@mail.ru

**Постановка проблемы.** Основой современного электропривода рудничных электровозов являются регулируемые коллекторные двигатели постоянного тока, которые используют как в контактных, так и в аккумуляторных электровозах. Эти электродвигатели, концептуально разработанные более 50 лет назад, сохранились в своей основе до настоящего времени. В результате развития они достигли предела, а именно в преобразовании электрической энергии постоянного тока в механическую. Известные предложения по их дальнейшему совершенствованию как по объективным, так и по субъективным причинам не находят применения [1].

Непрерывное увеличение нагрузки на угольную лаву и повышение производительности труда шахтеров прежде всего обусловлены возрастанием энерговооруженности горных машин и механизмов, что объективно привело к необходимости адекватного повышения технического уровня рудничных электровозов. В частности, рекомендуется в 1,5–2 раза увеличить габаритную мощность тяговых аккумуляторных электродвигателей, в 4–5 раз повысить надежность, увеличить КПД и пр.

Главное направление в решении этих задач – замена в тяговом электроприводе постоянного тока на трехфазный переменный ток.

**Анализ исследований и публикаций.** При разработке нового поколения отечественного тягового электропривода рудничных электровозов целесообразно использовать опыт ведущих зарубежных фирм смежной отрасли – в тяговом электроприводе железнодорожных локомотивов. Вопросам применения трехфазного переменного тока в тяговом электроприводе подвижных транспортных средств посвящено относительно немного исследований и публикаций отечественных и зарубежных авторов (например, [2, 3]).

В контексте рассматриваемой проблемы особое значение имеют работы, отражающие последние достижения в области об-



**В. Л. ДЕБЕЛЫЙ,**  
доктор техн. наук  
(ДРО «МАНЭБ»)



**В. А. СЕВОСТЬЯНОВ,**  
канд. техн. наук  
(ДРО «МАНЭБ»)

щепромышленного железнодорожного транспорта. К ним относятся разработки безредукторных регулируемых трехфазных синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) [2, 3]. Стремление исключить сложный коллекторно-щеточный узел из конструкции двигателя, а также ограниченные возможности охлаждения закрытых двигателей постоянного тока стимулировали внедрение наиболее высоконадежных бесколлекторных трехфазных двигателей. Их внедрение на железнодорожном транспорте стало возможным благодаря разработке электронного способа регулирования питающего напряжения, а также мощных постоянных магнитов.

Значительные успехи в этом направлении достигну-

ты при совершенствовании тягового электропривода железнодорожных локомотивов [3], что было обусловлено разработкой и промышленным применением в 1970–1980 гг. качественно новых постоянных магнитов, а также внедрением силовых управляемых полупроводниковых вентилях (транзисторов и тиристоров типа IGBT) и микропроцессоров.

В 1980-е годы производили искусственные постоянные магниты с редкоземельными элементами. Широко использовали неодимовые магниты, намного более мощные, чем простые ферромагнитные магниты и магниты из других сплавов, обладающие высокими характеристиками [4]. В неодимовых магнитах в качестве магнитного материала использован сплав железа с неодимом и бором. Такие магниты способны поднимать груз, превышающий собственный вес более чем в 200 раз (например, небольшой магнит размером в человеческий кулак может удерживать 350–400 кг). Кроме того, неодимовые магниты имеют повышенную прочность. Расширение промышленного производства новых магнитных материалов уменьшило их стоимость. В результате применения редкоземельных элементов снижается удельная масса магнитов, уменьшаются их габариты, поэтому можно реализовать принципиально новые конструкции магнитных систем.

Впервые сверхмощные магниты на керамике были использованы в тяговых электродвигателях скутера и мотороллера в Японии (1995–1996 гг.) [2]. Электропоезд на магнитном подвесе движется и управляется магнитными силами. Сейчас в мире эксплуатируются разные устройства с постоянными магнитами мощностью до 1000 кВт.

В Германии, Японии и Франции широко ведутся исследования тягового электропривода синхронных двигателей с постоянными магнитами. Несколько сот единиц подвижного состава с такими приводами успешно эксплуатируются во Франции, Испании и в Южной Корее. В странах Европы большее внимание уделяют асинхронному электродвигателю. В СССР исследования в этой области были начаты в конце 1960-х годов и вначале опережали зарубежные разработки. В дальнейшем ведущие зарубежные фирмы сосредоточили уси-

лия в данном направлении и достигли весомых результатов.

**Цель исследования.** Изучение особенностей конструкции трехфазных тяговых синхронных двигателей с постоянными магнитами и обоснование рекомендаций по созданию перспективных отечественных безредукторных тяговых синхронных двигателей с постоянными магнитами для рудничных электровозов.

**Результаты исследования.** Последнее достижение в области железнодорожной тяги общепромышленных локомотивов – разработка и внедрение безредукторного синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Применение постоянных магнитов в синхронном двигателе позволяет исключить щетки и коллектор, облегчить ротор, уменьшить момент его инерции и существенно увеличить частоту вращения. Последнее обстоятельство особенно важно для магистральных электровозов. Нынешний мировой рекорд скорости опытного электропоезда с синхронным двигателем с постоянными магнитами французской фирмы «АЛЬСТОМ», установленный 3 апреля 2007 г., составил 574,8 км/ч.

По сравнению с асинхронными тяговыми двигателями синхронные двигатели с постоянными магнитами имеют более высокий КПД (на 1,5–2 %) благодаря отсутствию электрических потерь в роторе, лучшему соотношению максимальной полезной мощности и массы и повышенным динамическим характеристикам, поэтому они меньше нагреваются, т. е. меньше расход охлаждающего воздуха.

Сила, приходящаяся на единицу площади воздушного зазора СДПМ, составляет 5,5 Н/см<sup>2</sup>, в перегрузочных режимах она достигает 10 Н/см<sup>2</sup>. Для тяговых двигателей с диаметром полного колеса 1250 мм площадь воздушного зазора безредукторного двигателя может быть 2,12 м<sup>2</sup>. Следовательно, сила тяги на ободе колеса в номинальном режиме составит 69000 кН с возможностью перегрузки в 1,5–2 раза, что вполне достаточно для электровоза. Указанные факторы позволили разработать электропривод малозумный, энергосберегающий, в герметичном или взрывозащищенном исполнении и не требующий значительного технического обслуживания. Его массогабаритные и силовые характеристики

практически аналогичны самовентилируемым асинхронным двигателям.

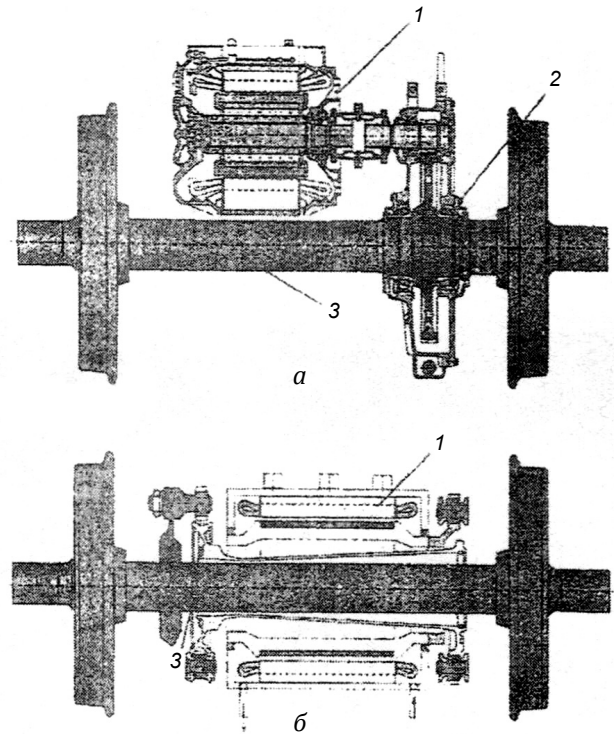
Преобразователь частоты для питания СДПМ по сути такой же, как и для питания тяговых вентильных двигателей с электромагнитным возбуждением или асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. В частности, можно применять автономные инверторы напряжения с входными индуктивно-емкостными фильтрами или трехфазные инверторы тока на транзисторах типа IGBT с широтно-импульсной модуляцией. Для концепции тягового привода СДПМ характерна необходимость индивидуального питания двигателей, что означает отказ от дешевого группового. Используются индивидуальные преобразователи, каждый из которых питает один тяговой двигатель, что увеличивает стоимость привода.

Перечисленные преимущества СДПМ позволили реализовать непосредственный, т. е. безредукторный привод (рис. 1). Реализовать необходимый крутящий момент порядка 50 кН·м в небольшом монтажном пространстве для разработчиков двигателей сложно. Целесообразнее применить безредукторный привод. Удаление из-под кузова металлоемких редукторов с периодически вытекающей смазкой дает дополнительные существенные преимущества СДПМ, а также уменьшает стоимость жизненного цикла электровоза.

Безредукторный привод позволяет создать для электровоза принципиально новую конструкцию тележки, в которой электрическое и тормозное оборудования будут объединены в единую конструкцию. При этом снижается общая масса тележки, повышаются ее надежность и эффективность, а также уменьшаются затраты на продление жизненного цикла.

При ходовых испытаниях экспериментального поезда фирмы «Сименс» было достигнуто почти 50 %-е снижение потерь, которые в обычном приводе приходились на двигатель и на редуктор. Масса привода уменьшилась на 30 %. Кроме того, важные преимущества безредукторной конструкции – более низкий уровень шума, отсутствие масла и снижение объема технического обслуживания тягового привода.

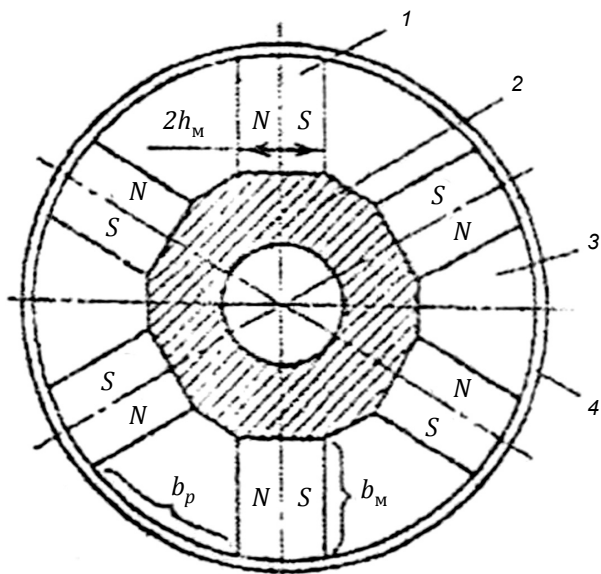
Сравнительные схемы асинхронного двигателя с редуктором на электропоезде фир-



**Рис. 1.** Компонка колесно-моторного блока электровоза: а – для электровоза с асинхронным двигателем; б – для безредукторного привода с синхронным двигателем с постоянными магнитами; 1 – тяговой двигатель; 2 – редуктор; 3 – колесная пара.

мы «Сименс» (Германия) и безредукторного синхронного двигателя с постоянными магнитами представлены на рис. 1. Существуют разные конструкции СДПМ. Так, на японском электропоезде с колесными парами изменяемой колеи установлены синхронные двигатели с наружным ротором, который представляет собой постоянный магнит. Внутренний статор с главной обмоткой закреплен на втулке и жестко соединен с колесом. В СДПМ постоянные магниты обычно встроены в железный сердечник ротора, одна из причин этого – устранение риска повреждения хрупких магнитов. В целях обеспечения высокой динамики листы ротора изготавливают не сплошными, а с пазами. Благодаря этому уменьшается момент инерции ротора и время разгона двигателя.

Для безредукторного двигателя иногда применяют ротор коллекторного типа (рис. 2) с призматическими магнитами 1, намагниченными в тангенциальном направлении. Их внутренние торцы примыкают к немагнитной



**Рис. 2.** Ротор с постоянными магнитами: 1 – призматические постоянные магниты; 2 – немагнитная втулка; 3 – сегменты из магнитомягкого материала; 4 – бандаж бочки ротора из немагнитной стали.

втулке 2, а боковые поверхности – к сегментам 3 из магнитомягкого материала, снаружи ротор охвачен бандажом 4 из немагнитной стали. Магниты крепят клеем, усиленным немагнитными клиньями над магнитами, сегментом 3 в виде «ласточкина хвоста» крепят к втулке 2. В некоторых двигателях (Россия) вращающий момент тягового двигателя пассажирского тепловоза предполагается передавать на колесную пару через полый карданный вал. Разработаны также конструкции сборных индукторов с постоянными магнитами, оптимизированные по максимуму магнитного потока (мозаичные сборные роторы). Их основные преимущества:

- увеличение в тех же габаритах магнитного потока и ЭДС на 20–50 %;
- возможность достижения больших значений магнитного потока и индукции в зазо-

ре путем заполнения объема ротора магнито-твердым материалом с пониженными и магнитными свойствами, но не дефицитного и низкой стоимости, например ферритом;

- значительное снижение потерь на вихревые токи и перемагничивание, обусловленное малой электрической проводимостью.

Для улучшения использования активного объема двигателя целесообразно применять большое число полюсов и дробное число пазов, относящихся к одному полюсу и фазе. При проектировании привода СДПМ из-за физических свойств магнитов необходимо учитывать некоторые ограничения: по максимальному моменту двигателя, по моменту в верхней части диапазона скоростей, по термической перегрузке двигателя.

**Выводы.** Электродвигатели тяговые постоянного тока рудничных электровозов, концептуально разработанные более 50 лет назад, в процессе развития достигли совершенства в преобразовании электрической энергии в механическую.

Генеральным направлением в этих условиях является замена тягового электропривода постоянного тока на трехфазный переменный. В качестве электропривода рекомендуется использовать безредукторный привод с синхронными двигателями с постоянными магнитами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Севостьянов В. А. Новая концепция электропривода рудничных аккумуляторных электровозов / В. А. Севостьянов, Д. В. Дебелый // Вестник МАНЭБ. – Т. 16. – № 3. – 2011. – С. 114.
2. Rothwell J. Yasunori Takahashi's Supermagnets / J. Rothwell // Infinite Energy. – 1996. – 1(5,6). – P. 33.
3. Кучумов В. А. Синхронные двигатели на постоянных магнитах / В. А. Кучумов, А. С. Нестрахов, А. С. Княжева // Локомотив. – 2007. – № 12. – С. 3–37.
4. Неодимовый магнит [Электронный ресурс]. – Режим доступа [www.magnitos.com.ua](http://www.magnitos.com.ua).