

Совершенствование синхронного тягового двигателя на постоянных магнитах

Специалисты Исследовательского института железнодорожной техники (RTRI, Япония) усовершенствовали разработанный ранее герметизированный синхронный тяговый двигатель с возбуждением от постоянных магнитов для использования в пригородных электропоездах нового поколения. Двигатель имеет принципиально новую систему охлаждения, эффективность которой подтверждена результатами испытаний. Оптимизация конструкции постоянных магнитов позволила повысить реактивный момент, за счет чего снижено максимальное значение тока. Исследования и расчеты показали, что благодаря применению новых тяговых двигателей потребление энергии электропоездами может быть снижено на 12 %, а уровень шума — на 7 дБ.

Асинхронные электродвигатели с самовентиляцией широко применяются в качестве тяговых на железнодорожном подвижном составе. Однако они требуют периодической разборки для чистки внутренних конструктивных элементов; к тому же установленный на валу двигателя вентилятор при высокой частоте вращения представляет собой источник ощутимого акустического шума. Хотя применение двигателей полностью закрытого исполнения позволяет избежать этих проблем, они имеют худшие характеристики охлаждения по сравнению с двигателями с принудительной вентиляцией. Поэтому в целом герметизированные асинхронные двигатели имеют меньшую выходную мощность и большие массу и габари-

ты при той же выходной мощности. Между тем прогресс в области постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов сделал возможным разработку мощных синхронных двигателей с возбуждением от таких магнитов (СДПМ), которые в общем случае имеют более высокий КПД и требуют меньших затрат на охлаждение, чем асинхронные двигатели. Поэтому специалистами RTRI была начата разработка тяговых СДПМ полностью закрытого исполнения, имеющих такие же массогабаритные показатели и выходную мощность, что и обычные асинхронные двигатели с самовентиляцией (см. «Железные дороги мира», 2006, № 10, с. 28 – 34), применительно к пригородным электропоездам. В результате

были созданы герметизированные тяговые СДПМ мощностью сначала 140 кВт, а затем и 235 кВт (для пригородных электропоездов нового поколения).

Проведенная работа

Разработку первого СДПМ полностью закрытого исполнения для пригородных поездов вели с 1998 по 2001 г. Номинальная мощность электродвигателя выбрана равной 140 кВт, что достаточно для его использования в качестве тягового на типичном пригородном электропоезде. В процессе разработки было показано, что новый двигатель может обладать такой же выходной мощностью, что и традиционный асинхронный двигатель с самовентиляцией, имеющий те же габариты и массу, а также то, что КПД двигателя может быть повышен с 92 до 97 %, а уровень акустического шума снижен на 10 дБ по сравнению с традиционным двигателем.

Конструкция

Повышение мощности

Для пригородных поездов был успешно разработан герметизированный СДПМ мощностью 140 кВт. Однако для пригородных поездов нового поколения, основные характеристики одного из которых приведены ниже, требуется большая мощность.

В связи с этим было принято решение о разработке СДПМ с примерно теми же массогабаритными параметрами, что и у двигате-

Характеристики электропоезда нового поколения	
Составность поезда	Один моторный, два прицепных вагона
Максимальная скорость, км/ч	140
Ширина колеи, мм	1067
Напряжение контактной сети, В	1500 постоянного тока

ля мощностью 140 кВт, но с мощностью, повышенной до 235 кВт. Сравнительные характеристики двух таких двигателей приведены в таблице.

Для повышения мощности двигателя без ощутимого увеличения массы и габаритов был реализован ряд конструктивных мер. Во-первых, чтобы увеличить диаметр стального сердечника статора, применена безрамная конструкция. Во-вторых, чтобы увеличить длину стального пакета сердечника, решено отказаться от использования датчика положения ротора и применить не требующее использования такого датчика векторное управление. В-третьих, число полюсов с четырех доведено до шести. В общем случае увеличение числа полюсов позволяет уменьшить как глубину ярма, так и длину вылета лобовых частей обмоток, в результате можно увеличить длину пакета и внутренний диаметр статора.

Система охлаждения

Помимо совершенствования указанных элементов конструкции, была использована новая система охлаждения, позволяющая улучшить температурный режим в зонах подшипников, которые имеют меньшее допустимое значение превышения температуры, чем обмотка статора. На рис. 1 показан опытный СДПМ (в разрезе) с оптимизированной системой охлаждения.

В разработанном ранее СДПМ мощностью 140 кВт применялись два компонента системы охлаждения. Во-первых, вокруг одного из подшипников создано кольцевое охлаждающее пространство, чтобы обеспечить тепловую изоляцию этого подшипника от имеющего высокую температуру воздуха внутри двигателя. Во-вторых, на оси вне двигателя со стороны другого подшипника установлен небольшой диск с пазами, чтобы на-

Основные характеристики СДПМ

Показатель	Номинальная мощность, кВт	
	140	235
Исполнение	Полностью закрытое	
Конструкция	Рамная	Безрамная
Тип постоянных магнитов	Металлокерамические на основе Nb – Fe – В	
Число полюсов	4	6
Класс изоляции	H	200
Длина пакета сердечника статора, мм	180	220
Наружный диаметр сердечника статора, мм	516	536
Определение положения ротора	По датчику	Без датчика
Номинальная частота вращения, об/мин	2550	2960
Масса, кг	570	620

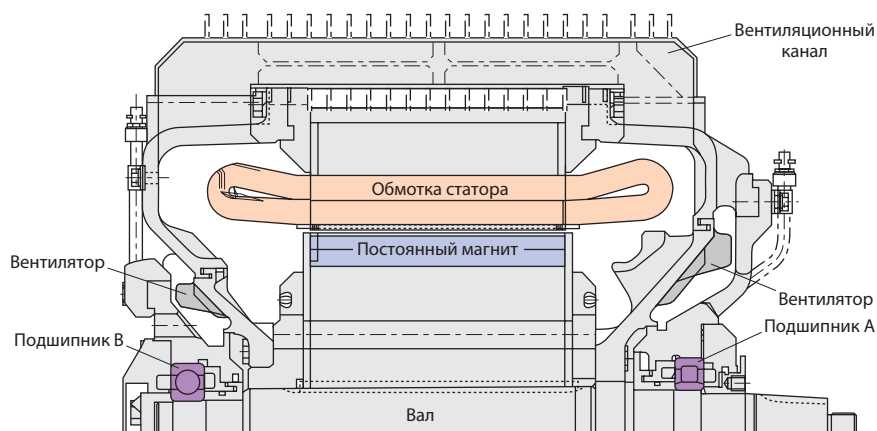


Рис. 1. Продольный разрез опытного СДПМ

правлять вокруг этого подшипника поток охлаждающего воздуха. В СДПМ мощностью 235 кВт применена комбинация этих компонентов, т. е. в охлаждаемом пространстве размещен небольшой дополнительный вентилятор, чтобы направлять поток охлаждающего воздуха вокруг подшипников. Такая конструкция настолько эффективна, что превышение температуры подшипников не больше, чем в обычных двигателях с самовентиляцией.

Для проверки работы системы охлаждения были проведены тепловые испытания. Их результаты представлены на рис. 2.

Во время испытаний на двигатель принудительно направляли охлаждающий воздух, чтобы имитировать поток воздуха, имеющий

место при движении поезда. Электропитание поступало от инвертора напряжения, двигатель работал с номинальной выходной мощностью. Результаты показали, что

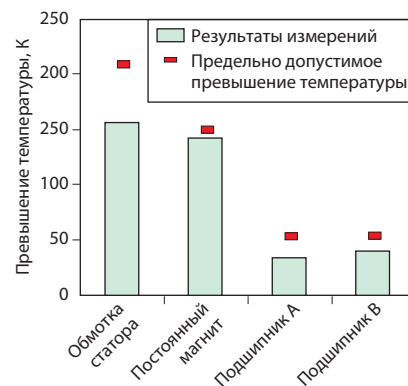


Рис. 2. Результаты тепловых испытаний СДПМ мощностью 235 кВт

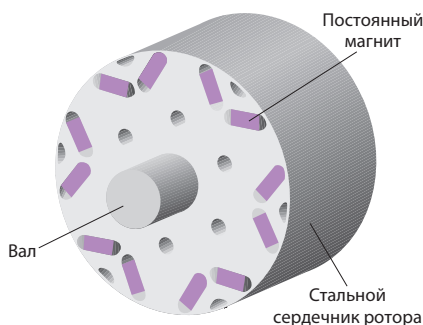


Рис. 3. Ротор СДПМ

значения превышения температуры подшипников, постоянных магнитов и обмотки были ниже установленных предельных.

Явнополюсный ротор

При использовании СДПМ в качестве тягового для железнодорожного подвижного состава возникает одна существенная техническая проблема: необходимо уменьшить

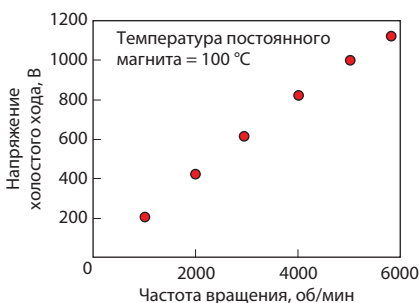


Рис. 4. Результаты испытаний двигателя без нагрузки

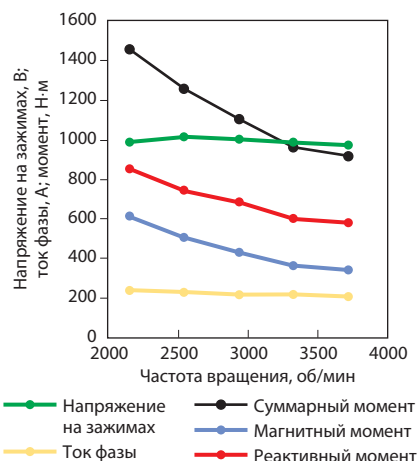


Рис. 5. Результаты испытаний двигателя под нагрузкой

максимальный ток, поддерживая при этом напряжение холостого хода в заданных пределах. Увеличение напряжения холостого хода, вызываемое потоком, который создают постоянные магниты, приводит к нежелательному самопроизвольному рекуперативному торможению и повреждению изоляции как инвертора, так и двигателя. Поэтому максимальное напряжение холостого хода должно быть ниже значения максимального напряжения инвертора. Однако это условие ограничивает значение момента, создаваемого постоянными магнитами при ограниченном токе.

Напряжение холостого хода U_0 может быть выражено как

$$U_0 = p\omega\Psi_m, \quad (1)$$

где p — число пар полюсов; ω — частота вращения (рад/с); Ψ_m — потокосцепление постоянных магнитов (Вб).

Как видно из (1), напряжение холостого хода возрастает прямо пропорционально частоте вращения ротора и потокосцеплению постоянных магнитов. Следовательно, предельное значение потокосцепления постоянных магнитов ($\Psi_{m \text{ limit}}$) можно получить исходя из предельного значения напряжения холостого хода ($U_{0 \text{ limit}}$), когда частота вращения ротора максимальна (ω_{max}):

$$\Psi_{m \text{ limit}} \leq U_{0 \text{ limit}}/p\omega_{\text{max}}. \quad (2)$$

Выходной крутящий момент T двигателя можно найти по формуле

$$T = p\Psi_m I_d I_q + p(L_d - L_q) I_d I_q, \quad (3)$$

где I_d — ток по оси d ; I_q — ток по оси q ; L_d — индуктивность по оси d ; L_q — индуктивность по оси q .

Данное выражение основано на двухосевой модели явнополюсной синхронной электрической машины. Первый член в правой части уравнения (3) относится к магнитному моменту, второй — к реактивному моменту. Когда значение Ψ_m ограничено, значение маг-

нитного момента также ограничено, поскольку ограничено значение входного тока. Однако реактивный момент не зависит от потокосцепления постоянных магнитов, поэтому с использованием реактивного момента может быть получен дополнительный момент. Его значение возрастает пропорционально разности индуктивностей по осям d и q , обусловленной явнополюсной конструкцией ротора. В связи с этим в усовершенствованном СДПМ применены встроенные в ротор постоянные магниты и оптимизирована структура стального сердечника ротора для лучшего использования реактивного момента. Конструкция ротора схематично показана на рис. 3. Видно, что в каждый полюс ротора V-образно встроены два постоянных магнита для увеличения создаваемого реактивного момента.

На рис. 4 представлены результаты испытаний двигателя без нагрузки, на рис. 5 — результаты испытаний под нагрузкой. Значение магнитного момента рассчитывали с использованием измеренного значения напряжения холостого хода и тока по оси q , значение реактивного момента — путем вычитания значения магнитного момента из суммарного значения момента. Согласно данным испытаний, реактивный момент составлял около 60 % выходного момента. Следовательно, подтверждено, что реактивный момент эффективно используется для увеличения выходного момента, т. е. для уменьшения входного тока.

Характеристики СДПМ

Потребление электроэнергии

Потребление электроэнергии электропоездом с тяговыми СДПМ для оценки экономии, достигаемой за счет применения таких двигателей, рассчитывали путем численного моделирования.

На основе этих данных и с учетом сопротивления движению, ограничений скорости и характеристик поезда были построены кривые движения. Для расчета потерь в тяговых двигателях использовали эквивалентную цепь и характеристики потерь в двигателе, основанные на результатах испытаний. Предполагалось также, что во всех случаях эффективно используется рекуперативное торможение.

Результаты расчета представлены на рис. 6. Установлено, что СДПМ полностью закрытого исполнения имеют меньшие потери по сравнению с традиционными тяговыми двигателями благодаря отсутствию потерь в меди ротора и меньшей величине потерь на охлаждение, чем в двигателях с самовентиляцией. Величина потерь для герметизированного СДПМ составляет примерно половину потерь для асинхронного двигателя с самовентиляцией, вследствие чего потребление электроэнергии для электропоезда с тяговыми СДПМ на 12 % меньше, чем для поезда с традиционными тяговыми двигателями. Благодаря снижению энергопотребления уменьшается эмиссия углекислого газа, а также сокращаются затраты на потребляемую электроэнергию.

Уровень акустического шума

Измерение уровня акустического шума проводили с целью подтверждения влияния полностью закрытой конструкции на снижение уровня шума. При проведении испытаний двигатель работал на холостом ходу. Уровень шума измеряли с помощью приборов, установленных на расстоянии 1 м от поверхности двигателя в четырех горизонтальных направлениях (параллельно и перпендикулярно оси двигателя), а также в одном вертикальном направлении (над двигателем). Измерения выполняли согласно методике, установ-

Основные исходные данные условного поезда и маршрута для расчета потребления энергии	
Составность поезда	Три моторных и четыре прицепных вагонов
Масса тары, т	264
Полезная нагрузка, т (при населенности 100 %)	62,6
Максимальная скорость, км/ч	130
Длина маршрута, км	199
Число станций	47

ленной действующими японскими стандартами.

На рис. 7 показана зависимость среднего уровня шума по пяти направлениям от частоты вращения СДПМ. Для сравнения приведены также результаты аналогичных измерений для традиционного асинхронного двигателя с самовенти-

ляцией. При одном и том же значении частоты вращения уровень шума от СДПМ полностью закрытого исполнения ниже, чем от асинхронного двигателя с самовентиляцией. Максимальное различие отмечено при максимальной частоте вращения, когда уровень шума, излучаемого СДПМ, оказался на 7 дБ ниже. Таким образом, можно заключить, что применение герметизированных СДПМ позволяет значительно снизить уровень шума.

Выводы

Выполненные расчеты и испытания показали, что СДПМ полностью закрытого исполнения обладает следующими преимуществами перед традиционным асинхронным двигателем:

- энергопотребление поезда с тяговыми СДПМ благодаря более высокой эффективности двигателя снижено на 12 %;
- уровень акустического шума от СДПМ при максимальной частоте вращения снижен на 7 дБ;
- отсутствует необходимость в периодической разборке двигателя для чистки (требуется только уход за подшипниками).

Новые тяговые двигатели установлены на экспериментальном электропоезде типа U2 компании JR West, который планируется ввести в регулярную эксплуатацию в ближайшей перспективе.

M. Kondo et al. Quarterly Report of RTRI, 2008, № 1, p. 16 – 19.

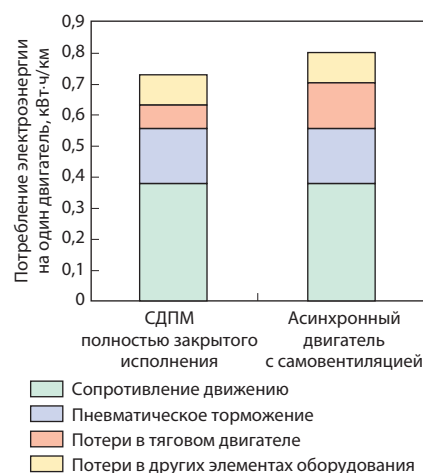


Рис. 6. Результаты расчета энергопотребления поезда с тяговыми СДПМ

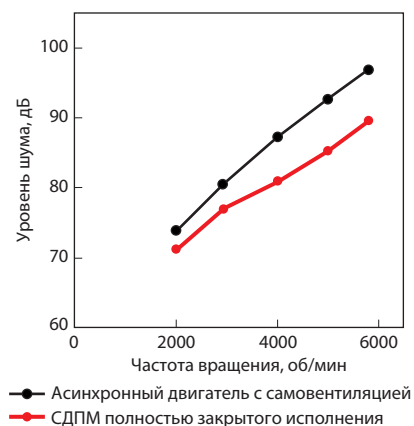


Рис. 7. Результаты измерения уровня шума