

УДК 621.313.13

## Тяговый электродвигатель с постоянными магнитами на роторе: характеристика и перспективы применения в транспортной отрасли

П. Г. Колпахчян, А. Ю. Рязанов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Колпахчян П. Г., Рязанов А. Ю. Тяговый электродвигатель с постоянными магнитами на роторе: характеристика и перспективы применения в транспортной отрасли // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 145–157. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-145-157

### Аннотация

**Цель:** В статье рассматривается возможность применения синхронных электрических машин с постоянными магнитами (IPMsynRM) в качестве тяговых двигателей на электроподвижном составе железных дорог. Основное внимание уделено особенностям и характеристикам электродвигателя IPMsynRM с целью выявления перспектив его использования на железнодорожном транспорте. **Методы:** Проведен анализ различных вариантов исполнения электрических машин и особенностей управления ими при использовании в составе тягового электропривода. **Результаты:** Было установлено, что в качестве тягового двигателя возможно использование синхронного реактивного двигателя с постоянными магнитами IPMsynRM, который благодаря внутреннему расположению магнитов и немагнитным отверстиям в магнитопроводе позволяет обеспечить высокие удельные показатели мощности на единицу массы и объема, КПД, меньший вес и лучший пусковой момента. Обобщены характеристики и особенности IPMsynRM. Рассмотрены попытки его применения на электромобилях и электропоездах, что позволяет выдвигать его на роль потенциального двигателя для транспортных средств. **Практическая значимость:** Результаты работы имеют значение для транспортной отрасли, так как расширяют представления об особенностях энергоэффективного электродвигателя IPMsynRM с точки зрения его использования в составе тягового электропривода электроподвижного состава на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** Электродвигатель, транспортная отрасль, ротор, тяговая система, синхронный тяговый двигатель, постоянные магниты.

### Введение

Использование электроприводов в электрической тяге поездов эволюционировало от приводов постоянного тока к приводам переменного тока [1]. Одним из преимуществ тягового электропривода на базе электрических машин переменного тока является возможность увеличения осевой мощности тяговых двигателей и повышения их надежности за счет отказа от коллектора. Развитие силовой электроники, в первую очередь IGBT-модулей, на большие токи и напряжения сделало возможным применение современных методов управления тяговыми

двигателями. Использование таких способов регулирования тяговых двигателей переменного тока, как векторное регулирование или прямое управление моментом, позволяет обеспечить высокое быстродействие регулирования и большую динамическую жесткость механической характеристики тягового электропривода. Это позволяет создавать эффективные системы борьбы с боксованием и юзом и повысить использование сцепного веса на 20–25 % выше по сравнению с коллекторными тяговыми двигателями. Помимо этого, стоит отметить более низкие требования к техническому обслуживанию и большую надежность, а также высокую эффективность и удельную мощность, обеспечиваемые приводами переменного тока [2].

В настоящее время асинхронные тяговые двигатели (IM) являются основным типом электрических машин, применяемых в качестве тяговых двигателей на тяговом подвижном составе. Они в полной мере удовлетворяют требованиям по использованию сцепного веса, массогабаритным показателям, надежности и автоматизации. Появление редкоземельных постоянных магнитов сделало возможным их использование для установки их на роторе синхронных электрических машин (SM) [3]. Наличие возбуждения на роторе позволяет добиться лучших, по сравнению с асинхронными электрическими машинами, удельных показателей. Потери на роторе у электрических машин с постоянными магнитами намного меньше, чем у асинхронных, так как у них отсутствуют потери скольжения. Поэтому в последнее время синхронные электрические машины с постоянными магнитами на роторе рассматриваются в качестве альтернативы асинхронным электрическим машинам для использования в качестве тяговых двигателей на электроподвижном составе.

Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (PMSMs) привлекают повышенное внимание благодаря присущим им достоинствам, таким как высокие удельные показатели, высокий КПД и хорошая управляемость. В настоящее время существует тенденция к расширению их использования в качестве тяговых двигателей на железных дорогах [4].

Особенностью тягового двигателя является работа в двух зонах. В первой зоне, при скорости ниже номинальной, тяговый двигатель работает в режиме ограничения по моменту. С ростом частоты вращения напряжение, прикладываемое к обмотке статора, увеличивается, что соответствует режиму работы с полным полем. В номинальном режиме напряжение достигает предельного значения и во второй зоне, при дальнейшем увеличении частоты вращения, остается неизменным. Тяговый двигатель переходит в режим работы с ограничением по мощности, для реализации которого необходимо ослабление поля. Наличие нерегулируемого возбуждения у тяговых двигателей с постоянными магнитами на роторе делает невозможным реализацию двухзонной работы за счет ослабления поля.

Необходимо использование другого подхода, основанного на использовании реактивной составляющей момента.

Возможность реализации реактивного момента в синхронном двигателе с постоянными магнитами зависит от конструкции ротора. Возможны различные варианты расположения постоянных магнитов: двигатели с поверхностным магнитным креплением (SPM) и двигатели с внутренним постоянным магнитом (IPM). Некоторые варианты конфигурации роторов представлены на рис. 1.



Рис. 1. Различные конфигурации роторов (слева направо): асинхронный, или индукционный, двигатель (IM); синхронный двигатель с внутренним постоянным магнитом (IPMSM); синхронные двигатели с внутренним постоянным магнитом и обмоткой ротора (IPMSM с прямым пуском); синхронный двигатель с поверхностным постоянным магнитом (SM-PMSM); синхронный реактивный двигатель (SynRM)

Двигатели SPM относительно просты в изготовлении, поскольку магниты прочно прикреплены к поверхности ротора и фиксируются бандажом. Однако для таких двигателей существует риск разрушения магнитов при работе на высокой скорости. Двигатели IPM, напротив, обеспечивают более высокую надежность ротора, поскольку магниты встроены в магнитопровод ротора. Более того, двигателям IPM уделяется все большее внимание из-за возможности поддержания постоянной мощности в широком диапазоне изменения частоты вращения [5].

### Характеристика электродвигателя IPMSynRM

В настоящее время для управления синхронными двигателями используются технологии векторного регулирования. Это позволяет обеспечить точное позиционирование поля статора относительно положения ротора. В результате можно получить требуемую тяговую характеристику [6]. Применение ротора со встроенными магнитами и ориентирование магнитного поля статора относительно положения ротора в пределах  $45^\circ$  (регулирование угла нагрузки) обеспечивает регулирование крутящего момента независимо от частоты вращения. Такой двигатель называется IPMSynRM.

IPMSynRM — это синхронный тяговый электродвигатель с постоянными магнитами на роторе (рис. 2), имеющий реактивную составляющую момента.

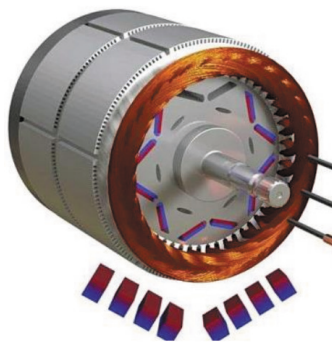


Рис. 2. Синхронный тяговый электродвигатель с постоянными магнитами на роторе IPMSynRM

Двигатель IPMSynRM объединяет в себе технологии SynRM и PMSM, которые используют как разницу в индуктивностях по продольной и поперечной осям, так и потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами. В этом двигателе постоянные магниты устанавливаются не на поверхности ротора, а в прорезях внутри ротора и выполняют функцию материала с высоким магнитным сопротивлением для синхронного реактивного двигателя.

Ротор состоит из слоев барьеров (воздух) и сегментов (сталь). Его крутящий момент зависит от двух аспектов: реактивного момента и момента от постоянных магнитов (магнитоэлектрического). Основываясь на анизотропной структуре геометрии ротора, роторы IPMSynRM можно разделить на три различные категории [7]:

- традиционный простой ротор;
- анизотропный ротор с осевым расположением (ALA);
- анизотропный ротор с поперечным расположением (TLA).

Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами на роторе представляет собой возможную альтернативу приводам переменного тока для тяговых применений. В целом важные характеристики и преимущества IPMSynRM можно сформулировать следующим образом [8]:

- лучший пусковой момент. На низких оборотах поле магнитов взаимодействует с вращающимся полем статора, создавая крутящий момент, а на высоких — компенсируется, не генерируя паразитные напряжения в статорных обмотках;
- высокий КПД (до 96 % против 94 % у асинхронного двигателя);
- меньший нагрев и упрощенная система охлаждения ротора;
- улучшенные массогабаритные показатели. За счет уменьшения потерь на нагрев ротора удастся уменьшить размеры и вес двигателя;
- низкая стоимость. Установлено, что синхронный двигатель IPMSynRM (использует реактивную составляющую момента) на 25 % дешевле синхронного двигателя с постоянными магнитами (IPMSM).

Важной особенностью IPMSynRM является его высокая эффективность, учитывая герметичное исполнение и более высокий КПД. Поскольку в данном

электродвигателе нет тока возбуждения и тока ротора, то потери в роторе минимальны. Уровень потерь в данных электродвигателях составляет примерно половину от потерь асинхронного двигателя. Потери в синхронных тяговых двигателях с постоянными магнитами состоят в основном из потерь в магнитопроводе статора и электрических потерь в обмотке.

Перспективы и попытки применения IPMsynRM в транспортной отрасли

Синхронные двигатели с постоянными магнитами в последнее время вызывают значительный интерес благодаря своей высокой эффективности, легкости и низкой стоимости жизненного цикла, что делает его перспективным в качестве тяговых двигателей нового поколения в транспортной отрасли. В настоящее время уже ведутся исследования по дальнейшей оптимизации данного электродвигателя, направленные на повышение его эффективности.

Существует несколько производителей синхронных электродвигателей с постоянными магнитами для использования на железнодорожном транспорте (табл. 1) [9].

ТАБЛИЦА 1. Производители тяговых электродвигателей с постоянными магнитами

| Оператор                                | Поезда                                                               | Производитель |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------|
| SNCF                                    | 31xCitadis — двойной трамвай — железнодорожные транспортные средства | Alstom        |
| Praha                                   | 15T для городского низкопольного трамвая                             | Skoda         |
| Прототипы и другие испытательные поезда |                                                                      |               |
| München U-Bahn                          | Комплект поездов метро C19 с тележками Syntegra                      | Siemens       |
| Китай                                   | Прототип локомотива с топливными элементами                          | CNR Yongji    |
| Турция                                  | Низкопольный трамвай Citadis X04                                     | Alstom        |
| Япония                                  | Поезд со сменой колеи 2                                              | RTRI          |

Так, в исследовании [10] авторы проводят сравнительный анализ асинхронного двигателя IM и синхронного двигателя с постоянными магнитами, динамическая карта эффективности двигателя которого интегрируется в систему управления энергоэффективным поездом (EETC). Было установлено, что замена IM на PMSM в качестве тягового двигателя не требует внесения изменений в систему управления поездом и синхронный электродвигатель позволяет экономить не менее  $1,01 \text{ кВт} \cdot \text{ч/км}$ , достигая коэффициента энергосбережения 12,96 %.

Поскольку электродвигатель с постоянными магнитами не имеет хрупких магнитов на поверхности, он прост и надежен, вследствие чего может быть изготовлен с низкими затратами. Тяговые двигатели для железнодорожных транспортных средств должны быть долговечными и прочными. В качестве тяговых двигателей на подвижном составе целесообразно использовать электродвигатели типа IPMsynRM, поскольку они способны обеспечивать эффективное использование

реактивной составляющей момента и принимать магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами, из условия ограничения величины индуцируемого в обмотке статора напряжения в режиме холостого хода на больших скоростях.

IPMsynRM может быть использован в качестве тягового двигателя с прямым приводом. Авторы [11] привели характеристики такого двигателя и указали на следующие положительные результаты: отсутствие требований к обслуживанию редуктора, низкий уровень шума, отсутствие потерь при передаче энергии. Полностью закрытый двигатель способствует минимальному попаданию пыли, что исключает необходимость разборки и чистки. В рамках компьютерного моделирования было отмечено, что при установке данного двигателя на узкоколейные пригородные электропоезда шум снизился на 14 дБ. Благодаря своей простой конструкции тяговый двигатель IPMsynRM типа прямого привода также может быть введен для электропоездов со сменной колеей и низкопольных трамваев.

Во время испытаний прототип тягового электродвигателя с постоянными магнитами, оснащенный разработанной системой охлаждения подшипников, был проверен на эффективность охлаждения и уровень шума. Испытания показали, что полностью закрытые тяговые двигатели с постоянными магнитами позволяют снизить шум на 10 дБ даже при высоких скоростях вращения и достичь высокой эффективности и компактности конструкции.

Следует отметить, что на производительность двигателя IPMsynRM большое влияние оказывает топология ротора. В работе [12] сравниваются четыре однослойных двигателя, которые используются в электромобилях, предполагая, что V-образный двигатель является наиболее подходящим с учетом анализа геометрических параметров.

Авторы работы [13] исследуют пять типичных синхронных тяговых электродвигателей с постоянными магнитами, используемых для высокоскоростных железнодорожных систем, с различными топологиями роторов, включая V-, U-, VV-, VU-, UU-образные формы (рис. 3).

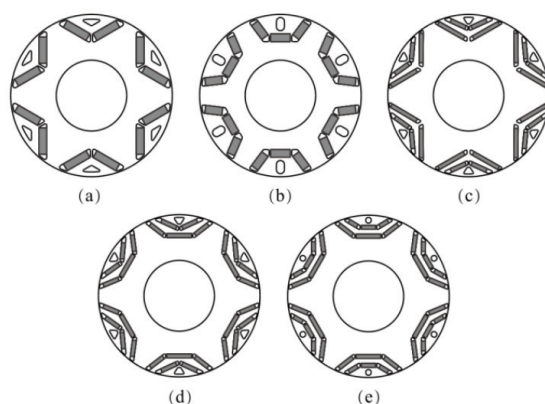


Рис. 3. Топологии ротора: *а* — V-образная, *б* — U-образная, *в* — VV-образная, *г* — VU-образная, *д* — UU-образная формы

Выявлено, что U-образный двигатель обладает наилучшей отказоустойчивостью, так как при использовании такой топологии ротора имеется возможность ограничивать как напряжение холостого хода, так и ток короткого замыкания [14].

Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами обеспечивает лучшую экономичность благодаря значительному снижению потерь на роторе.

Говоря про электромобили, набирающие в настоящее время большую популярность, отметим, что электродвигатель IPMSynRM используется в модели Tesla Model 3. В двигателе используется 6-полюсная конструкция, обеспечивающая повышенный крутящий момент и силу. Гибридный электромобиль Toyota Prius, выпускаемый автопроизводителем Toyota, также использует электродвигатель IPMSynRM. В нем используются два двигателя такого типа: один для привода колес, а другой — для выработки электроэнергии. Двигатели Toyota Prius содержат магниты в виде одного элемента на полюс, в то время как в двигателях Tesla Model 3 магниты разделены на сегменты [15].

В работе [16] описано использование небольшого, компактного синхронного реактивного двигателя с постоянными магнитами для серийного гибридного электромобиля, а также выделены преимущества и недостатки этого привода по сравнению с другими. Показано, что оптимально спроектированная роторно-реактивная синхронная машина с барьерным потоком обладает хорошей плотностью крутящего момента и высоким КПД. Анализ, проведенный авторами, очень интересен, поскольку в нем сравнивались синхронный реактивный двигатель и двигатель внутреннего сгорания в автомобиле (седан) с точки зрения ускорения до максимальной скорости 120 км/ч. В статье показано, что IPMSynRM с максимальным крутящим моментом 120 Нм выгодно отличается от двигателя внутреннего сгорания автомобиля с точки зрения ускорения от 0 до 100 км/ч.

В связи с тем, что синхронный тяговый электродвигатель с постоянными магнитами сочетает в себе технологию synRM, это делает его сильным конкурентом с точки зрения стоимости, веса и эффективности. Среди основных преимуществ синхронного реактивного двигателя подчеркиваются хорошая удельная мощность, соотношение мощности и веса, экономичность и эффективное охлаждение.

Особенностью синхронных тяговых электродвигателей с постоянными магнитами является необходимость применения герметичной конструкции. Значительно более низкий, по сравнению с асинхронными тяговыми двигателями, уровень потерь на роторе позволяет создать такую конструкцию. Перегрев ротора и повышение температуры постоянных магнитов приводит к существенному ухудшению их характеристик. Поэтому проблема охлаждения элементов конструкции синхронной электрической машины с постоянными магнитами все равно является одной из наиболее сложных, особенно в случае применения на электроподвижном составе в качестве тяговых двигателей. Также необходимо учитывать высокий уровень динамических воздействий на элементы конструкции тягового

двигателя, что может вызывать разрушение постоянных магнитов и ухудшение их характеристик.

### Особенности управления синхронным тяговым двигателем в составе тягового электропривода

В составе тягового электропривода тяговый двигатель до номинальной скорости движения работает с постоянным моментом. Напряжение, прикладываемое к обмотке статора, растет и достигает предельного значения при номинальной скорости. При дальнейшем увеличении скорости тяговый двигатель переходит в режим работы с постоянством мощности. Особенностью синхронных тяговых двигателей с постоянными магнитами на роторе является отсутствие возможности регулирования возбуждения. Это накладывает ограничения на величину потокосцепления, создаваемого постоянными магнитами: ЭДС на холостом ходу не должна превышать номинального значения напряжения обмотки статора. Поэтому в номинальном режиме, при номинальном значении тока, статора невозможно получить номинальный электромагнитный момент только за счет взаимодействия с магнитным полем от постоянных магнитов. В этом случае возникает необходимость использовать реактивную составляющую момента, которая может быть получена при топологии ротора с погруженным расположением магнитов (см. рис. 3). Учитывая, что для тягового электропривода локомотивов и моторвагонного подвижного состава характерным является то, что номинальная скорость составляет порядка 50–60 % от максимальной, реактивный момент должен достигать половины и более от полного момента тягового двигателя с постоянными магнитами на роторе.

При указанной выше конструкции ротора электромагнитные процессы в тяговом двигателе описываются уравнениями явнополюсной синхронной электрической машины. В этом случае электромагнитный момент определяется выражением:

$$M_y = \frac{3}{2} p \left( \Psi_f I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq} \right), \quad (1)$$

где  $p$  — число пар полюсов;

$\Psi_f$  — потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами;

$I_{sd}, I_{sq}$  — проекции тока статора на продольную и поперечную оси;

$L_{sd}, L_{sq}$  — индуктивности статора по продольной и поперечной осям.

Составляющие тока статора по продольной и поперечной осям могут быть выражены через угол между векторами потокосцепления ротора и тока статора — угол нагрузки:

$$I_{sd} = I_s \cos(\delta), \quad I_{sq} = I_s \sin(\delta), \quad (2)$$

где  $\delta$  — угол нагрузки.

Тогда с учетом (2) выражение (1) для электромагнитного момента может быть записано в виде:

$$M_y = \frac{3}{2} p \left( \Psi_f I_s \sin(\delta) + \frac{1}{2} (L_{sd} - L_{sq}) I_s^2 \sin(2\delta) \right), \quad (3)$$

где  $I_s$  — величина тока статора (амплитуда вектора).

Анализ выражения (3) показывает, что составляющая электромагнитного момента, создаваемого взаимодействием потокосцепления ротора и проекцией тока статора (магнитоэлектрическая), имеет синусоидальный закон изменения в зависимости от угла нагрузки. Реактивная составляющая момента, которая создается за счет разности в индуктивностях статора по продольной и поперечной осям, изменяется в зависимости от угла нагрузки в виде синусоиды с удвоенной частотой. Вид зависимости электромагнитного момента от угла нагрузки тягового электродвигателя с постоянными магнитами представлен на рис. 4.

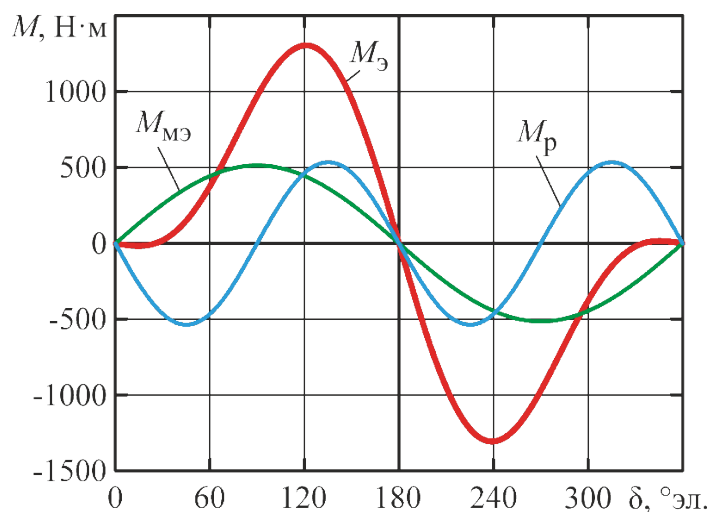


Рис. 4. Зависимость электромагнитного момента синхронного тягового двигателя от угла нагрузки:

$M_y$  — суммарный момент;  $M_{мэ}$  — магнитоэлектрическая составляющая;  
 $M_p$  — реактивная составляющая

Анализ приведенной зависимости электромагнитного момента показывает, что регулирование момента необходимо вести при изменении угла нагрузки от  $180^\circ$  эл (на рис. 4 — в диапазоне от  $120^\circ$  эл до  $240^\circ$  эл. В этом случае зависимость изменения момента имеет характер, близкий к линейному, что упрощает создание системы автоматического регулирования. Кроме того, на этом интервале соблюдается условие статической устойчивости.

## Выводы

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод, что синхронный тяговый электродвигатель IPMSynRM обладает большим потенциалом для успешного применения в транспортной индустрии, в особенности для железнодорожных транспортных средств, ввиду своих следующих особенностей:

- отсутствие цепи возбуждения (механическая конструкция проще, чем у классического асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором);
- при одинаковой подаче тока двигатель IPMSynRM может произвести крутящий момент на 10–15 % больше, чем индукционные двигатели;
- необходимо комбинированное использование магнитоэлектрического и реактивного моментов;
- меньший нагрев и упрощенная система охлаждения ротора;
- актуален тогда, когда энергосбережение и сохранение окружающей среды являются важнейшими социальными проблемами.

Применение синхронных электрических машин с другой топологией ротора не позволяет использовать реактивный момент. Поэтому их применение на тяговом подвижном составе, где тяговый двигатель работает в двухзонном режиме, ограничено, так как требует существенного увеличения массы и габаритов.

Однако внедрение синхронных тяговых двигателей с постоянными магнитами требует проведения дальнейших исследований с целью улучшения характеристик и технологичности конструкции, повышения надежности и снижения стоимости, чтобы обеспечить реализацию его преимуществ по сравнению с другим типами тяговых двигателей.

## Список источников

1. Steimel A. Electric Traction-Motive Power and Energy Supply / A. Steimel // Oldenbourg Industrierlag GmbH: Munich, Germany. — 2008.
2. Bolvashenkov I. Methodology for Selecting Electric Traction Motors and its Application to Vehicle Propulsion Systems / I. Bolvashenkov, J. Kammermann, H. Herzog // Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. — 2016. — Pp. 1214–1219.
3. Le Moal E. The Permanent Magnet Synchronous Motor from a Customer Point of View: REGIO 2N vs. REGIOLIS / E. Le Moal, A. Chamaret, P. Mannevy, O. Bouger // Proceedings of the International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference. — 2016. — Pp. 1–4.
4. Matsuoka K. Development trend of the permanent magnet synchronous motor for railway traction / K. Matsuoka // IEEJ Trans on Electr Electr. — 2007. — Vol. 2. — Iss. 2. — Pp. 154–161.

5. Pellegrino G. Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application / G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi, B. Boazzo // IEEE Trans. Ind. Electron. — 2012. — Vol. 59. — Iss. 2. — Pp. 803–811.
6. Казакбаев В. М. Разработка высокоэффективного синхронного реактивного двигателя: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В. М. Казакбаев. — Екатеринбург, 2017. — 22 с.
7. Taghavi S. Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications / S. Taghavi. — Concordia University Montreal, Quebec, Canada, 2015.
8. Vagati A. Design criteria of high performance synchronous reluctance motors in Industry Applications Society Annual Meeting / A. Vagati, G. Franceschini, I. Marongiu, G. P. Trogia // Conference Record of the 1992 IEEE. — 1992. — Vol. 1. — Pp. 66–73.
9. Polater N. Technical review of traction drive systems for light railways / N. Polater, P. Tricoli // Energies. — 2022. — Vol. 15. — Iss. 9. — P. 3187.
10. Yang P. Energy-Efficient Train Control: A Comparative Study Based on Permanent Magnet Synchronous Motor and Induction Motor / P. Yang, Ch. Fuwang, Ch. Feng, W. Chaoxian et al. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2024. — Pp. 1–13.
11. Kondo M. Application of permanent magnet synchronous motor to driving railway vehicles / M. Kondo // Railway technology avalanche. — 2003. — Vol. 1. — Iss. 6.
12. Liu X. Research on the performances and parameters of interior PMSM used for electric vehicles / X. Liu, H. Chen, J. Zhao, A. Belahcen // IEEE Trans. Ind. Electron. — 2016. — Vol. 63. — Iss. 6. — Pp. 3533–3545.
13. Yu D. Design and comparison of interior permanent magnet synchronous traction motors for high speed railway applications / D. Yu, X. Y. Huang, Y. T. Fang, J. Zhang // IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). — 2017.
14. Barcaro M., Fornasiero E., Bianchi N., Bolognani S. Design procedure of IPM motor drive for railway traction. IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011.
15. Ansari A. A. A Review of Different Motor Types and Selection of One Optimal Motor for Application in EV Industry. International Journal of Electrical and Power Engineering, 2022, vol. 16, Iss. 1, pp. 1–7.
16. Malan J., Kamper M. J., Williams P. N. T. Reluctance Synchronous Machine Drive for Hybrid Electric Vehicle. IEEE, 2001, vol. 37, Iss. 5, pp. 1319–1324.

Дата поступления: 27.03.2025

Решение о публикации: 03.05.2025

**Контактная информация:**

КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — д-р техн. наук, доц.; kolpahchyan@pgups.ru

РЯЗАНОВ Андрей Юрьевич — студент; ryazanov.andrei@list.ru

# Characteristics of a Traction Motor with Permanent Magnets on the Rotor and Its Potential Application in the Transport Industry

P. G. Kolpakhchyan, A. Yu. Ryazanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Kolpakhchyan P. G., Ryazanov A. Yu. Characteristics of a Traction Motor with Permanent Magnets on the Rotor and Its Potential Application in the Transport Industry. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 145–157. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-145-157

## Summary

**Purpose:** To consider the potential use of synchronous electric machines with permanent magnets (IPMsynRM) as traction motors on railway electric rolling stock. The primary focus of this study is an analysis of the characteristics of the IPMsynRM electric motor, with the objective of identifying the potential for its utilization in rail transport. **Methods:** A comprehensive analysis was conducted of a variety of versions of electric machines, with a focus on their control mechanisms when employed as components of a traction electric drive. **Results:** It was determined that a synchronous reluctance motor with permanent magnets (IPMsynRM) can be utilized as a traction motor. This is due to the internal arrangement of magnets and non-magnetic holes in the magnetic circuit, which provide high specific power per unit of mass and volume, efficiency, reduced weight and enhanced starting torque. The IPMsynRM characteristics and features were summarized in the paper. The utilization of the engine in electric cars and trains is a subject of consideration, thus enabling its proposition as a potential engine for vehicles. **Practical significance:** The research results will be important for the transport industry, as they expand the understanding of the features of the IPMsynRM energy-efficient electric motor in the aspect of its use as part of a traction electric drive of the railway electric rolling stock.

**Keywords:** IPMsynRM electric motor, transport industry, rotor, traction system, PMSMs.

## References

1. Steimel A. Electric Traction-Motive Power and Energy Supply. Oldenbourg Industrieverlag GmbH: Munich, Germany, 2008.
2. Bolvashenkov I., Kammermann J., Herzog H. Methodology for Selecting Electric Traction Motors and its Application to Vehicle Propulsion Systems. Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2016, pp. 1214–1219.
3. Le Moal E., Chamaret A., Mannevy P., Bouger O. The Permanent Magnet Synchronous Motor from a Customer Point of View: REGIO 2N vs. REGIOLIS. Proceedings of the International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference, 2016, pp. 1–4.
4. Matsuoka K. Development trend of the permanent magnet synchronous motor for railway traction. IEEJ Trans on Electr Electr, 2007, vol. 2, Iss. 2, pp. 154–161.
5. Pellegrino G., Vagati A., Guglielmi P., Boazzo B. Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application. IEEE Trans. Ind. Electron, 2012, vol. 59, Iss. 2, pp. 803–811.

6. Kazakbaev V. M. *Razrabotka vysokoeffektivnogo sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a highly efficient synchronous reluctance motor: author's abstract. diss. ... cand. tech. sciences]. Ekaterinburg, 2017, 22 p. (In Russian)
7. Taghavi S. Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications. Concordia University Montreal, Quebec, Canada, 2015.
8. Vagati A., Franceschini G., Marongiu I., Troglia G. P. Design criteria of high performance synchronous reluctance motors in Industry Applications Society Annual Meeting. Conference Record of the 1992 IEEE, 1992, vol. 1, pp. 66–73.
9. Polater N., Tricoli P. Technical review of traction drive systems for light railways / N. Polater. *Energies*, 2022, vol. 15, Iss. 9, p. 3187.
10. Yang P., Fuwang Ch., Feng Ch., Chaoxian W. et al. Energy-Efficient Train Control: A Comparative Study Based on Permanent Magnet Synchronous Motor and Induction Motor. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, pp. 1–13.
11. Kondo M. Application of permanent magnet synchronous motor to driving railway vehicles. *Railway technology avalanche*, 2003, vol. 1, Iss. 6.
12. Liu X., Chen H., Zhao J., Belahcen A. Research on the performances and parameters of interior PMSM used for electric vehicles. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2016, vol. 63, Iss. 6, pp. 3533–3545.
13. Yu D., Huang X. Y., Fang Y. T., Zhang J. Design and comparison of interior permanent magnet synchronous traction motors for high speed railway applications. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2017.
14. Barcaro M., Fornasiero E., Bianchi N., Bolognani S. Design procedure of IPM motor drive for railway traction. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011.
15. Ansari A. A. A Review of Different Motor Types and Selection of One Optimal Motor for Application in EV Industry. *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 2022, vol. 16, Iss. 1, pp. 1–7.
16. Malan J., Kamper M. J., Williams P. N. T. Reluctance Synchronous Machine Drive for Hybrid Electric Vehicle. *IEEE*, 2001, vol. 37, Iss. 5, pp. 1319–1324.

Received: March 27, 2025

Accepted: May 03, 2025

#### Author's information:

Pavel G. KOLPAKHCHYAN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; [kolpahchyan@pgups.ru](mailto:kolpahchyan@pgups.ru)

Andrei Yu. RYAZANOV — Student; [ryazanov.andrei@list.ru](mailto:ryazanov.andrei@list.ru)