

УДК 621.313.323

## О ПРИМЕНЕНИИ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Р. Д. ГАЛИЕВ<sup>1</sup>, В. Е. ЗАЙЦЕВ<sup>2</sup>, А. И. ДОЙНИКОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ramagaliev@yandex.ru, <sup>2</sup> vadim.zaitzew2014@yandex.ru, <sup>3</sup>anton.doinikov2013@yandex.ru

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

**Аннотация.** Быстрое развитие синхронных машин с постоянными магнитами связано с развитием цифровых систем интеллектуального управления, применения высокоэффективных материалов, оптимизации технологии проектирования и других. В данной статье рассмотрена тенденция развития синхронных машин с постоянными магнитами (СМПМ), их классификация, новые конструкции, преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** синхронные машины, инкорпорированные постоянные магниты, встроенные магниты, сердечник, ротор, SPM, IPM.

### ВВЕДЕНИЕ

Синхронные электрические машины с постоянными магнитами (PMSM) являются перспективной технологией, обеспечивающей высокую эффективность и производительность в различных промышленных приложениях. Постоянные магниты играют решающую роль в работе таких машин, обеспечивая постоянный магнитный поток в роторе и значительно повышая их энергоэффективность.

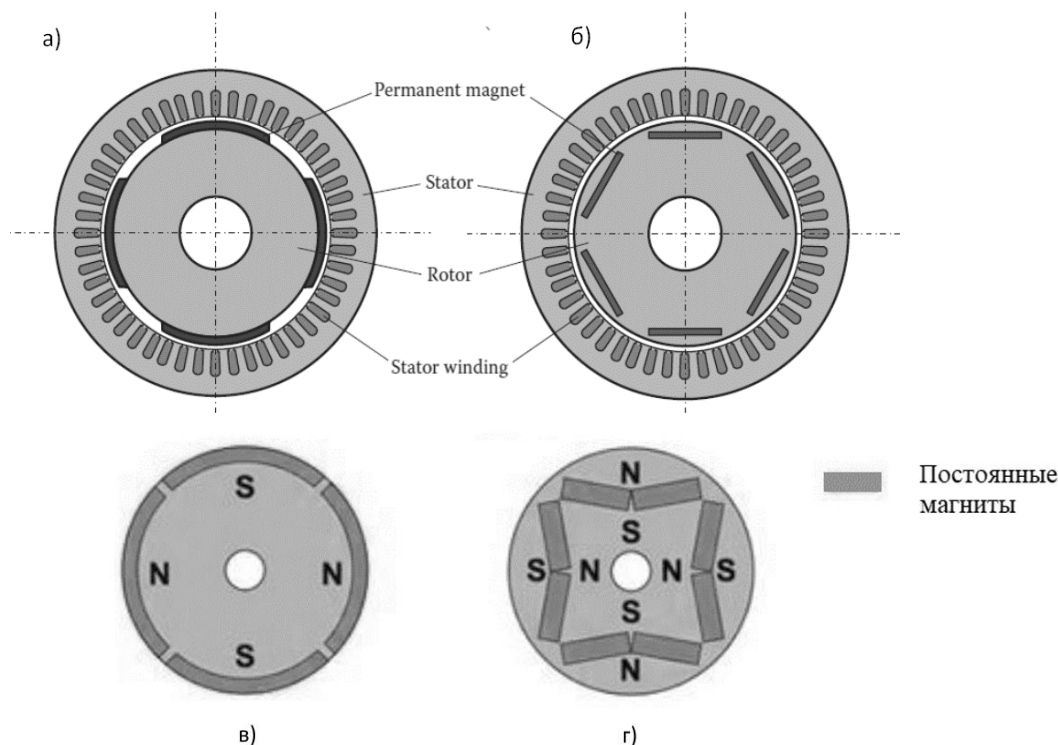
История развития постоянных магнитов уходит корнями в далекое прошлое. Ранние постоянные магниты из стали появились еще в 19 веке, но их магнитные свойства были относительно слабыми и нестабильными. Прорыв произошел с разработкой сплавов alnico в начале 20 века, которые обладали значительно лучшими магнитными характеристиками. Однако дальнейший значительный прогресс был достигнут с созданием редкоземельных постоянных магнитов на основе самария-кобальта (SmCo) в 1960-х годах и неодима-железа-бора (NdFeB) в 1980-х годах. Эти материалы обладают гораздо лучшими магнитными свойствами и позволили значительно улучшить характеристики PMSM.

Современные исследования в области PMSM охватывают широкий спектр направлений:

- оптимизация конструкции ротора и статора для повышения производительности и снижения потерь;
- разработка новых магнитных материалов с улучшенными свойствами и более доступной стоимостью;
- совершенствование систем управления и алгоритмов для повышения эффективности и надежности работы машин; [1]
- применение PMSM в различных областях, включая электромобили, ветроэнергетику и промышленные приводы, в авиационной и космической промышленности, где требуются высокая удельная мощность и надежность. [2]

## СРАВНЕНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН С ПОВЕРХНОСТНЫМИ И ИНКОРПОРИРОВАННЫМИ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Синхронные машины (СМ) с постоянными магнитами можно разделить на два основных типа: с поверхностными постоянными магнитами (SPM) и с инкорпорированными (встроенными) постоянными магнитами (IPM). Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки. Схемы СМ с постоянными магнитами и их роторы представлены на рисунке 1.



**Рис. 1.** СМ с постоянными магнитами (а) поверхностного расположения (SPM), (б) с постоянными магнитами внутреннего (инкорпорированного) расположения (IPM) [3] и роторы СМ с постоянными магнитами (в) поверхностного расположения, (г) встроенными (инкорпорированными)

### Преимущества SPM машин:

- поверхностный монтаж магнитов упрощает производственный процесс, благодаря этому можно добиться снижения затрат и сложности изготовления;
- простая схема управления.

### Недостатки SPM машин

- магниты чувствительны к тепловым и механическим воздействиям, особенно на более высоких скоростях;
- более уязвимы к размагничиванию и повреждению. Внешнее расположение магнитов подвергает их механическим и термическим воздействиям. Это может увеличить риск размагничивания, особенно при работе на высокой скорости или при высоких температурах. [4-6]

### Преимущества IPM машин:

- лучшая механическая защита магнитов от центробежных сил;
- имеет способность ослаблять магнитное поле, позволяя им сохранять эффективность в более широком диапазоне скоростей и нагрузок; [7]
- внутреннее расположение магнитов способствует лучшему отводу тепла, что ведет за собой снижение температуры. Сердечник ротора действует как защитный барьер, защищающий магниты от высоких температур и снижающий риск размагничивания.

Недостатки IPM машин:

- более сложная конструкция ротора, что усложняет и удорожает производство, особенно, если это клинообразные магниты;
- наличие пульсаций электромагнитного момента из-за изменения магнитной проводимости воздушного зазора;
- необходимость тщательного проектирования для предотвращения размагничивания магнитов.

Таким образом, выбор между SPM и IPM машинами зависит от конкретных требований, таких как температурные показатели и ограничения по стоимости производства.

### КОНСТРУКЦИЯ РОТОРОВ СМПМ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Можно выделить следующую классификацию роторов с магнитами для синхронных машин:

По расположению магнитов в роторе:

- с V-образным расположением магнитов. Магниты располагаются в V-образных пазах ротора. Более сложная конструкция ротора по сравнению с радиальным расположением.

Особенностью конструкции роторов с V-образным расположением магнитов является наличие перемычек из магнитомягкого материала, замыкающих в магнитной цепи “южные” и “северные” полюса магнитов. С одной стороны, они увеличивают поток рассеяния, который ограничен лишь участками локального насыщения этих перемычек в области стыка полюсов противоположной полярности, что ухудшает использование магнитов. Однако, с другой стороны, наличие дополнительных путей рассеяния упрощает сборку ротора и улучшает форму кривой индукции в зазоре под полюсами, приближая её к синусоидальной. [9,10]

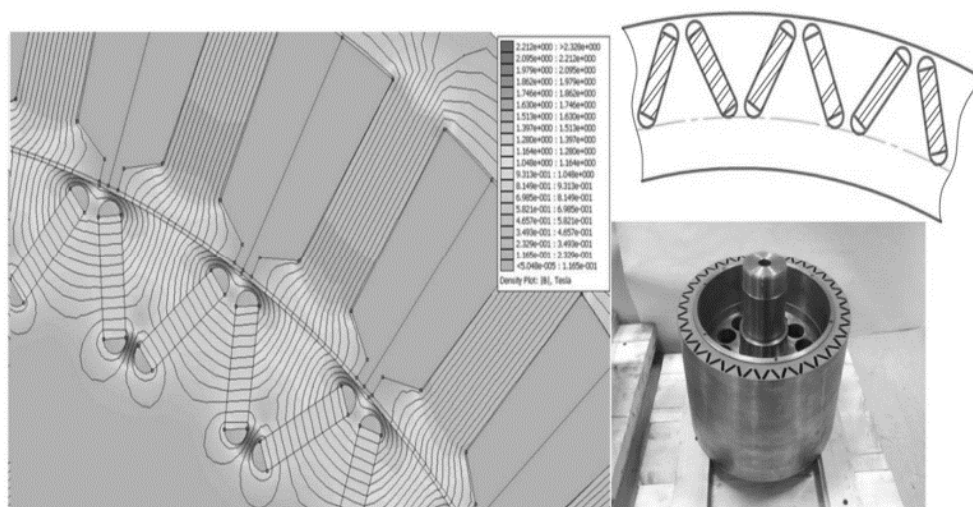
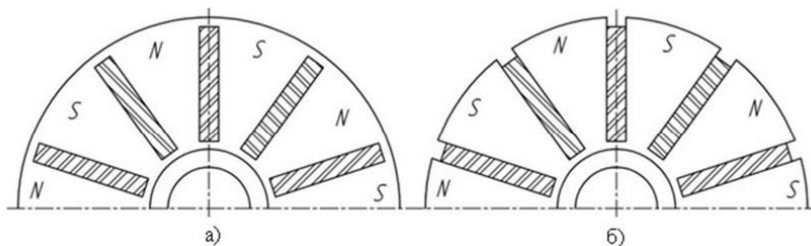


Рис. 4. Зубцово-пазовая структура и ротор генератора аварийного торможения с V-образными магнитами [10]

При данной конструкции на поверхности ротора между магнитом и воздушным зазором, а также между нижними частями пазов магнитов одного полюса реализованы мостики насыщения. Сравнительно сложная конфигурация магнитопровода ротора и нелинейная зависимость магнитной проводимости мостиков насыщения генератора предопределила использование метода конечно-элементного моделирования для расчета изменения магнитной индукции постоянных магнитов, расположенных в пазах ротора; [10]

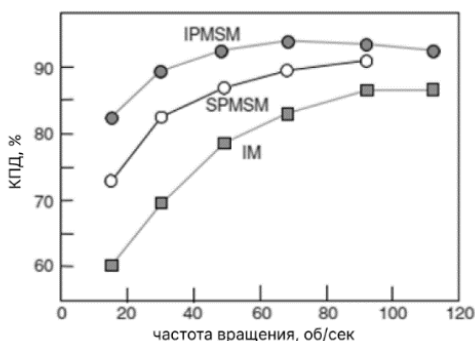
- с тангенциальным (параллельным) расположением магнитов. Магниты располагаются параллельно оси вращения на немагнитной втулке. Позволяет увеличить объем магнитов и повысить удельную мощность. Однако возникают пульсации электромагнитного момента из-за изменения магнитной проводимости воздушного зазора.



**Рис. 5.** Роторы с внутренней установкой с тангенциальным расположением постоянных магнитов: а) закрытыми, б) открытыми [11]

По форме магнитов:

- с прямоугольными магнитами. Чаще всего применяется, просты в производстве и не требуют дополнительных операций по изготовлению;
- со скошенными (клинообразными) магнитами. Магниты имеют скошенную (клинообразную) форму. Позволяет снизить пульсации электромагнитного момента по сравнению с прямоугольными магнитами. [12]



**Рис. 6.** Показатели эффективности IM, SPMSM и IPMSM [13]

Сравнительные показатели эффективности асинхронного двигателя (ИМ) той же выходной мощности, SPMSM и IPMSM показаны на рис. 7 [5]. Максимальный КПД при прочих равных условиях у IPMSM достигает 95%. Эффективность при низкой скорости составляет более 80%, что примерно на 20% и на 10% выше, чем у ИМ и SPMSM, соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СМПМ имеют более сложную конструкцию ротора по сравнению с машинами с поверхностными магнитами, что усложняет и удорожает производство. Однако электрические машины IPM, так и SPM имеют свои преимущества и ограничения, и выбор между ними должен основываться на конкретных требованиях предполагаемого применения. Прогресс в области электрических машин еще больше способствует развитию обоих типов электродвигателей, тем самым расширяя их область применения и эффективность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов И.В., Апальков Р.Г., Борисоглебский Н.А., Иванов А.С. Сравнительный анализ роторных систем синхронных машин на постоянных магнитах // The Scientific Heritage. 2021. №71-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-rotornyyh-sistem-sinhronnyh-mashin-na-postoyannyh-magnitah> (дата обращения: 10.05.2024).
2. Синхронный двигатель на постоянных магнитах (СДПМ) // VEDA MC URL: <https://drives.ru/stati/sinhronnyj-dvigatel-na-postoyannyh-magnitah/> (дата обращения: 12.05.2024).
3. Асанов С. Э., Умеров Ф.Ш. Сравнительный анализ электрических двигателей с постоянным магнитом, встроенным в ротор (IPM) и электрических двигателей с постоянным магнитом, установленном на поверхности ротора (SPM) [Электронный ресурс] // Железнодорожный транспорт: актуальные вопросы и инновации. - 2023. - Т. 4, № 4. - URL: <https://transportjournals.com/index.php/InnoTrans/article/view/34> (дата обращения: 12.05.2024).

4. S. Vidal-Bravo, J. de la Cruz-Soto, M. R. A. Paternina, M. Borunda, A. Zamora-Méndez, «Light electric vehicle powertrain: Modeling, simulation, and experimentation for engineering students using PSIM», Computer Applications in Engineering Education, т. 28, сс. 406–419, 2020.
5. ИПМ конструкции двигателя // СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ URL: <https://masters.donntu.ru/2012/etf/kravtsov/library/article10.htm> (дата обращения: 13.05.2024).
6. Синхронный двигатель с постоянными магнитами // Инженерные решения URL: <https://ru.about-motors.com/motorcontrol/pmsm/> (дата обращения: 13.05.2024).
7. Акта Туринского политехнического университета в Ташкенте. Перспективы развития электромобилей в Узбекистане [Электронный ресурс] // Акта Туринского политехнического университета в Ташкенте. - Том 12. - Выпуск 2. - Ноябрь 2022. - URL: <https://acta.polito.uz/index.php/journal/article/view/172> (дата обращения: 13.05.2024).
8. Смирнов А.Ю. Особенности конструирования и анализа высокооборотных синхронных машин с постоянными магнитами на роторе // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2013. №4 (101). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-konstruirovaniya-i-analiza-vysokooborotnyh-sinhronnyh-mashin-s-postoyannymi-magnitami-na-rotore> (дата обращения: 14.05.2024).
9. Корнеев, В. В. Расчетные коэффициенты и добавочные потери синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Корнеев Вячеслав Викторович. – Новосибирск, 2018. – 167 с. – URL: [https://www.nstu.ru/files/dissertations/dissertaciya\\_korneev\\_v.v.\\_1537332336.pdf](https://www.nstu.ru/files/dissertations/dissertaciya_korneev_v.v._1537332336.pdf) (дата обращения: 11.05.2024).
10. Харламов В.В., Москалев Ю.В., Серкова Л.Е. Анализ схем размещения постоянных магнитов на роторе четырехполюсной электрической машины // ОмГТУ. 2019. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-shem-razmescheniya-postoyannyh-magnitov-na-rotore-chetyrehpolusnoj-elektricheskoj-mashiny> (дата обращения: 11.05.2024).
11. Джабер Ахмед Ибрагим Джабер. Автономный преобразователь энергии ветра на базе бесконтактной машины постоянного тока : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.09.03 / Джабер Ахмед Ибрагим Джабер; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»]. - Санкт-Петербург, 2022. - 18 с.
12. «HEV Fundamentals», вHybrid Electric Vehicles, John Wiley & Sons, Ltd, 2017, сс. 45–71. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118970553.ch3>.

#### ОБ АВТОРАХ

**ГАЛИЕВ Рамиль Дамирович**, студент ПИШ «Моторы будущего» Уфимский университет науки и технологий.  
**ЗАЙЦЕВ Вадим Евгеньевич**, студент ПИШ «Моторы будущего» Уфимский университет науки и технологий.  
**ДОЙНИКОВ Антон Игоревич**, аспирант ПИШ «Моторы будущего» Уфимский университет науки и технологий.

#### METADATA

**Title:** On the application of incorporate permanent magnets in synchronous electric machines.

**Authors:** R. D. Galiev<sup>1</sup>, V. E. Zaitsev<sup>2</sup>, A. I. Doinikov<sup>3</sup>

**Affiliation:**

<sup>123</sup> Ufa University of science and technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>ramagaliev@yandex.ru, <sup>2</sup>vadim.zaitzew2014@yandex.ru, <sup>3</sup>anton.doinikov2013@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (31), pp. 35-39, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The rapid development of permanent magnet synchronous machines is associated with the development of digital intelligent control systems, the use of highly efficient materials, optimization of design technology, etc. This article discusses the development trend of permanent magnet synchronous machines (PMSM), their classification, new designs, advantages and disadvantages.

**Key words:** synchronous machines, incorporated permanent magnets, built-in magnets, core, rotor, SPM, IPM.

**About authors:**

**GALIEV Ramil Damirovich**, student of the AES "Motors of the Future" Ufa University of Science and Technology.

**ZAITSEV Vadim Evgenievich**, student of the AES "Motors of the Future" Ufa University of Science and Technology.

**DOINIKOV Anton Igorevich**, postgraduate student of the AES "Motors of the Future" Ufa University of Science and Technology