

УДК 621.313.8

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.05

С.А. Попов, В.И. Кривченков, М.А. Асташов, С.В. Попова

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

ОБЗОР МАГНИТНЫХ СТРУКТУР РОТОРОВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Рассмотрены и сравнены различные магнитные структуры роторов, применяемых в синхронных двигателях с постоянными магнитами. Во многих областях промышленности производимые на оборудовании операции требуют точного механического движения, будь то сборочные, точильные, сварочные операции, различные системы позиционирования, например, системы наведения солнечных батарей. Классическая реализация таких движений сводится к применению редукторного электропривода на отдельных узлах оборудования либо к установке одного привода для нескольких операций (концепция «главного» привода). Однако в редукторах и преобразователях вращательного движения в линейное всегда присутствуют люфты и зазоры. Кроме того, наличие дополнительных гибких связей вносит нелинейные возмущения в движение механизмов. Развитие современного электропривода и систем управления им позволяет отказаться от применения кинематических преобразователей и объединить двигатель с нагрузкой напрямую. Электропривод без применения кинематических преобразователей называется прямым (безредукторным) электроприводом. В таком приводе усилие передается без потерь скорости и точности, отсутствуют дополнительные нелинейности и упругости. Кроме того, ввиду отсутствия износа механических частей прямой привод становится более надежным по сравнению с редукторным. Наибольшее распространение в прямом электроприводе получили синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) ввиду их лучших по сравнению с другими типами двигателей характеристик. **Цель исследования:** рассмотреть принципиальные отличия структур роторов СДПМ. **Методы:** графическое исследование магнитных структур, использование схем замещения СДПМ. **Результаты:** рассмотрено влияние расположения магнитов на характеристики двигателя. Возникающий в случае явнополюсности ротора реактивный момент описан с точки зрения влияния его на управление двигателем. Введен коэффициент, характеризующий анизотропию магнитных свойств двигателя. Показаны угловые характеристики для разных типов роторов двигателей и влияние их на угол тока статора при управлении двигателем.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, явнополюсный ротор, неявнополюсный ротор, выступающие магниты, вставные магниты, встроенные магниты, реактивный момент.

S.A. Popov, V.I. Krivchenkov, M.A. Astashov, S.V. Popova

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

OVERVIEW OF MAGNETIC STRUCTURES OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR ROTOR

The article is devoted to the consideration and comparison of various magnetic structures of rotors used in permanent magnet synchronous motors. In many areas of industry, operations performed on equipment require precise mechanical movement, whether assembly, grinding, welding operation, different positioning systems, like solar trackers. The classic implementation of such movements is to the use of a reduction electric drive on individual equipment nodes or to the installation of one drive for several operations (the concept of a "main" drive). However, in gears and converters to linear motion, there are always backlashes and gaps. In addition, the presence of additional flexible bonds introduces nonlinear perturbations into the movement of mechanisms. The development of modern electric drives and control systems allows them to abandon the use of kinematic converters and combine the motor with the load directly. An electric drive without the use of kinematic converters is a direct (gearless) electric drive. In such a drive, the force is transmitted without loss of speed and accuracy, there are no additional non-linearities and elasticities. In addition, due to the absence of wear on the mechanical parts, direct drive becomes more reliable than reduction drive. The most common in direct electric drives are permanent magnet synchronous motors (PMSM) due to their best characteristics compared to other types of motor. **Purpose:** to consider the fundamental differences in the structures of the PMSM rotors. **Methods:** graphical study of magnetic structures, the use of PMSM equivalent circuits. **Results.** The influence of the arrangement of magnets on the characteristics of the motor is considered. Authors described the reluctance torque arising due to a rotor polarity in terms of its influence on motor control. A coefficient introduced that characterizes the anisotropy of the magnetic properties of the motor. Angular characteristics for different motor types and their influence on the stator current angle in motor control process shown.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, salient pole rotor, hidden pole rotor, projecting magnets, inset magnets, interior magnets, reluctance torque.

Введение

Электрические двигатели можно подразделить на три типа – двигатели постоянного тока, асинхронные и синхронные двигатели. До недавнего времени область применения последнего типа двигателей ограничивалась, как правило, установками большой мощности (крупные насосы, синхронные компенсаторы и др.) [1, 2]. На сегодняшний день круг возможных приложений синхронных двигателей значительно расширился, и сейчас в составе различного оборудования можно повсеместно встретить синхронные двигатели мощностью от десятых долей до нескольких десятков киловатт (о таких двигателях и пойдет речь далее). Данные изменения во многом произошли благодаря разработкам (как с точки зрения применяемых материалов [3, 4], так и с точки зрения системы управления [5–7]) в области электропри-

вода с синхронными двигателями, в которых отсутствует обмотка возбуждения, а вместо нее используются прикрепленные к ротору постоянные магниты.

Рост объема использования синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) можно объяснить их существенными преимуществами по сравнению с другими типами двигателей: отсутствие скользящих контактов, хорошая энергоемкость, возможность достижения высоких скоростей вращения, широкие возможности регулирования, в том числе и позиционного.

Структура ротора

В конструкции СДПМ наибольший интерес вызывает магнитная структура ротора. В зависимости от расположения роторных магнитов различают СДПМ с *поверхностными* магнитами и СДПМ со *встроенными* магнитами. У первого типа двигателей постоянные магниты расположены на поверхности ротора по его окружности, а у второго – непосредственно внутри ротора [8]. Для каждого типа двигателя распределение магнитного потока в воздушном зазоре должно быть как можно более близко к синусоидальному.

Применительно к СДПМ с поверхностными магнитами существуют особенности магнитной структуры ротора с *выступающими* магнитами (рис. 1, *а*) и ротора с *вставными* магнитами (рис. 1, *б*). Для наиболее часто используемых редкоземельных материалов относительная магнитная проницаемость магнитов ротора близка к единице, т.е. может быть принята равной магнитной проницаемости воздуха [9]. Именно поэтому ротор с выступающими магнитами будет *невнополюсным* и имеет симметричную магнитную структуру, а также, следовательно, и равные индуктивности по осям d, q ($L_d = L_q$). Напротив, ввиду наличия между полюсами ферромагнитного материала, ротор со вставными магнитами *явнополюсный* с точки зрения электромагнитных характеристик. Здесь магнитная структура несимметрична, и индуктивности по осям d, q отличаются ($L_d < L_q$).

Благодаря простому производственному процессу, низкой стоимости изготовления и меньшему моменту инерции ротор с выступающими магнитами широко распространен в машинах, которые работают в узком диапазоне мощностей. Кроме того, формирование полюсов на поверхности ротора позволяет легко достичь магнитной структуры с близким к синусоидальному распределению магнитного поля в зазоре.

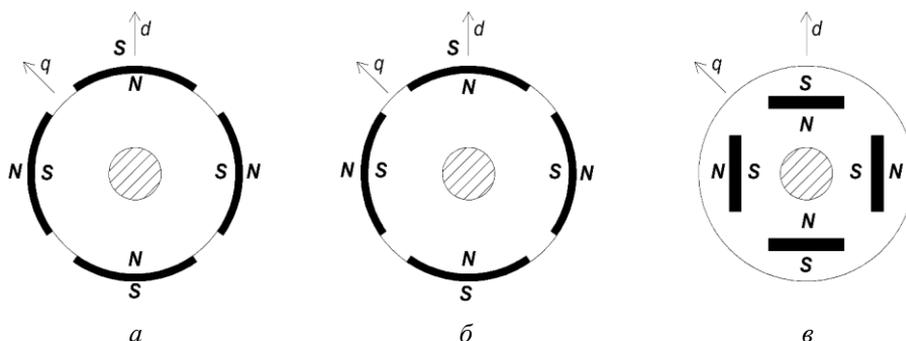


Рис. 1. Магнитные структуры роторов СДПМ (постоянные магниты зачернены): *а* – ротор с выступающими магнитами; *б* – ротор со вставными магнитами; *в* – ротор со встроенными магнитами. (Так как здесь изображены четырехполюсные роторы, оси *d* и *q* будут располагаться друг относительно друга под углом 45°)

Магнитная структура ротора со вставными магнитами (см. рис. 1, *б*) позволяет использовать формируемый асимметрией магнитной цепи *реактивный* момент (описан в следующем разделе). Таким образом, энергоёмкость и динамические характеристики двигателя могут быть улучшены по сравнению с описанным выше типом СДПМ. Кроме того, производственный процесс таких машин относительно прост. Свое применение этот тип СДПМ находит в приводах с переменной скоростью. В сравнении с машинами с выступающими магнитами двигатели со вставными магнитами имеют больший поток рассеяния и более высокую стоимость изготовления [9].

Магнитная структура ротора со встроенными магнитами изображена на рис. 1, *в*. Постоянные магниты в таком роторе скрыты полюсными наконечниками. Ротор является *явнополюсным*. К положительным качествам такой конструкции можно отнести повышенную перегрузочную способность и энергоёмкость, что объясняется наличием *реактивного* момента, возникающего из-за несимметричности магнитной цепи. Асимметрия магнитной цепи в СДПМ со встроенными магнитами более выражена, чем в СДПМ с поверхностными магнитами. Благодаря этому факту в них имеется возможность регулирования ослаблением потока [10–12], что позволяет повысить частоту вращения привода. Таким образом, заключим, что индуктивности L_d , L_q и их отношение L_q/L_d (называемое коэффициентом поперечного рассеяния ξ в [13], а в англоязычной литературе – коэффициентом анизотропии – saliency ratio) различаются для различных магнитных структур ротора.

Реактивный момент

Реактивный момент – это момент, возникающий ввиду того, что ротор стремится занять положение, в котором магнитное сопротивление, обусловленное его магнитным потоком, имеет наименьшую величину. Это явление используется в описанном выше двигателе со *встроенными* магнитами, где ротор имеет меньшее магнитное сопротивление потоку обмотки, чем потоку возбуждения (Φ_W и Φ_F на рис. 2, б соответственно). Поток Φ_W (ось q) проходит только через металлический ротор и воздушный зазор, в то время как поток Φ_F (ось d) дополнительно проходит через два постоянных магнита, относительная проницаемость которых примерно равна проницаемости воздушного зазора. Этим объясняется то, что магнитное сопротивление потоку поля Φ_F значительно выше, чем потоку обмотки Φ_W . Обычно эта разница составляет примерно 2:1 или более [14]. Двигатели такой конструкции часто называют *гибридными* СДПМ (вследствие того, что явление возникновения реактивного момента применяется также в реактивных синхронных двигателях [13, 15]).

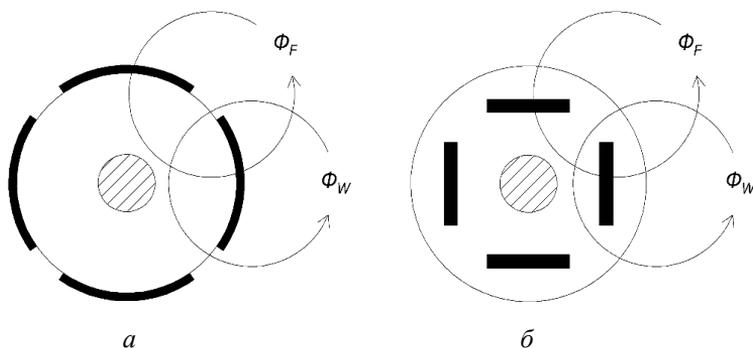


Рис. 2. Пути прохождения потока в роторе: *a* – с выступающими магнитами; *б* – со встроенными магнитами

Как видно из рис. 2, *a*, в роторе с *выступающими* магнитами оба потока проходят через одинаковые с точки зрения магнитных характеристик участки, так как области с магнитами можно представить в этом случае эквивалентными воздушному зазору. Поэтому реактивный момент здесь не возникает, и магнитные сопротивления по осям d , q одинаковы. Для СДПМ со *вставными* магнитами картина будет примерно та же, что и для двигателей со *встроенными* магнитами, ввиду их явнополюсной конструкции.

Различия в управлении

Электрические характеристики двигателя могут быть представлены схемой замещения, показанной на рис. 3, а. В данной схеме магниты и воздушный зазор смоделированы синусоидальным источником тока I_m , подключенным параллельно индуктивности L_0 . Сопротивление статорной обмотки и ее индуктивность рассеяния представлены здесь величинами R_s и L_l . Частота источника I_m для двигателя с количеством полюсов p определяется как $\omega p/2$, где ω – механическая угловая скорость. Упрощенная схема замещения показана на рис. 3, б, где эквивалентная индуктивность и ток источника тока равны [16]:

$$L'_0 = L_0 + L_l, \quad (1)$$

$$I'_m = I_m (L_0 / L'_0). \quad (2)$$

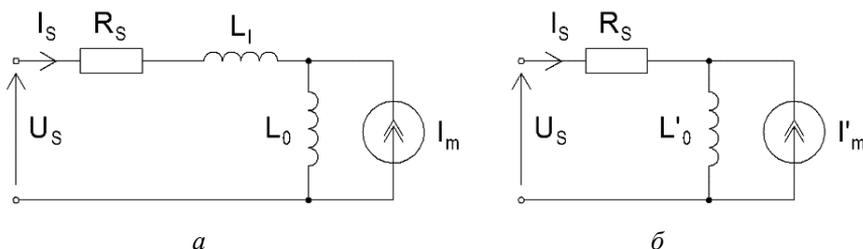


Рис. 3. Схемы замещения СДПМ

Для двигателя с *выступающими* магнитами, который ввиду своей неявнополюсности не обладает реактивным моментом, момент определится следующей формулой:

$$M = \frac{3p}{2} L'_0 I'_m I_s \sin \beta, \quad (3)$$

где β – угол между вектором магнитного поля ротора и вектором тока статора [11, 17], I_s – ток статора, p – количество полюсов двигателя.

Синусоидальная зависимость момента от угла тока статора проявляется в угловой характеристике, изображенной на рис. 4 (график $L_d = L_q$). Очевидно, что здесь максимум момента приходится на угол $\beta = 90^\circ$ (1,57 рад). Именно такую величину угла тока статора стремятся поддерживать при векторном управлении неявнополюсными СДПМ, задавая ток $i_d = 0$ [10, 11].

В то же время для СДПМ с *вставными* магнитами и СДПМ со *встроенными* магнитами момент выразится следующим образом [10]:

$$M = \frac{3p}{2} \left[L_d I_m' I_s \sin \beta + \left(\frac{L_d - L_q}{2} \right) I_s^2 \sin 2\beta \right], \quad (4)$$

где L_d и L_q – индуктивности по осям d и q .

Второе слагаемое в скобках в (4) выражает реактивный момент двигателя. Этот момент для СДПМ со *вставными* магнитами отрицателен в диапазоне $0^\circ < \beta < 90^\circ$ и положителен при $90^\circ < \beta < 180^\circ$, так как $L_d < L_q$. Угловая характеристика СДПМ со вставными магнитами изображена кривой $L_d < L_q$ на рис. 4. Как видно из графика, максимум момента достигается уже при угле β больше 90° . Соответственно и управление таким двигателем должно учитывать наличие реактивного момента и сдвигать угол тока статора на некоторую величину от 90° .

Для двигателей со *встроенными* магнитами соотношение индуктивностей в общем случае может быть различным (коэффициент ξ в зависимости от конфигурации магнитов и воздушных промежутков в роторе может быть как больше единицы, так и меньше [15]). Так, из графика $L_d > L_q$ (рис. 4) видно, что максимум момента смещается влево, в противоположность предыдущему случаю.

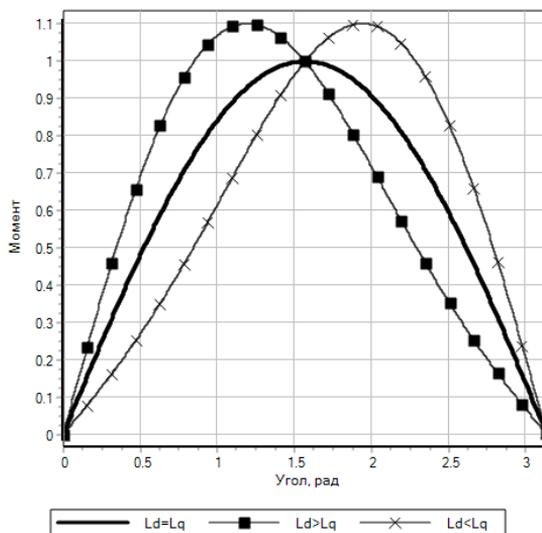


Рис. 4. Угловые характеристики в относительных единицах при различных соотношениях индуктивностей по осям d, q (индуктивности отличаются на $\pm 0,5$)

График создан в системе SimInTech [18].

Стоит отметить, что из (4) очевидно вытекает зависимость момента двигателя от разности индуктивностей по осям, а не от их отно-

шения, которое применено в коэффициенте ξ , введенном выше. Однако для наглядного представления различий в анизотропии ротора удобнее все же пользоваться относительной величиной, а не абсолютным значением. Кроме того, разница индуктивностей не дает информации о характеристиках двигателя, в то время как коэффициент ξ обеспечивает более общее представление таких характеристик, как коэффициент мощности, диапазон скоростей при постоянной мощности и некоторые аспекты динамики двигателя [19].

Перегрузочная способность

Для сравнения синхронных двигателей с постоянными магнитами перегрузочная способность является, пожалуй, решающим показателем выбора. Так, на рис. 5 можно отметить, что для СДПМ с *выступающими* магнитами перегрузка эффективна только в области низких скоростей. Такое поведение объясняется достижением точки «максимального момента на вольт» (MTPV – max torque per volt) [20]. На рис. 5, 6 эти точки показаны ромбами.

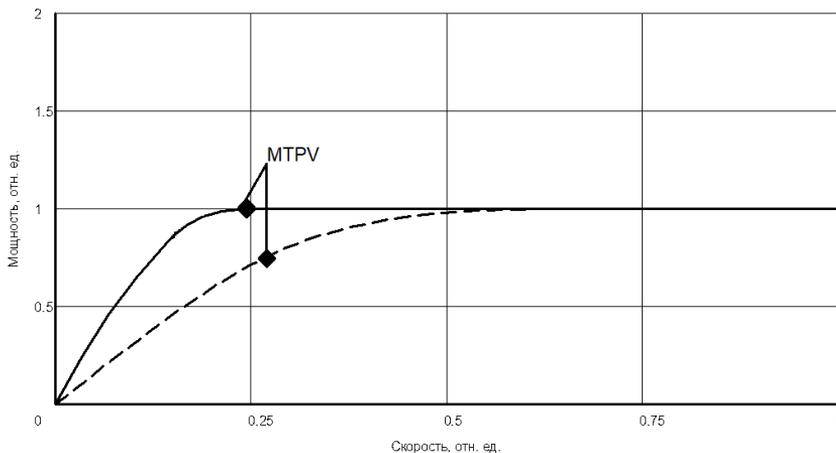


Рис. 5. График перегрузочной способности для СДПМ с *выступающими* магнитами (штриховая линия соответствует номинальному току $I_{ном}$, сплошная – $1,73I_{ном}$)

Для двигателей со *встроенными* магнитами (а также для двигателей со *вставными* магнитами, которые являются «переходным звеном» между двумя другими типами) точка MTPV достигается на более высоких скоростях. В частности, можно спроектировать двигатель так, чтобы ограничение по напряжению имело влияние только на максимальной скорости.

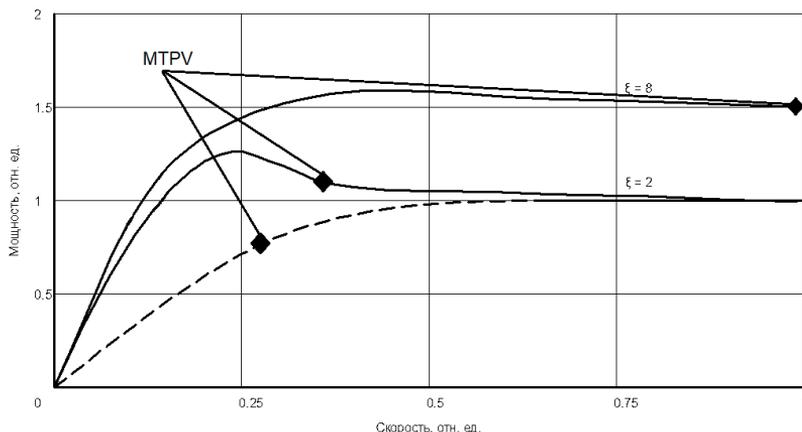


Рис. 6. График перегрузочной способности для СДПМ со встроенными магнитами (штриховая линия соответствует номинальному току $I_{\text{ном}}$, сплошные – $1,73I_{\text{ном}}$)

Перегрузочная способность СДПМ со *встроенными* магнитами тем больше, чем больше его коэффициент анизотропии ξ . На рис. 6 показаны графики перегрузочной способности для двух двигателей с различными ξ . При большей анизотропии свойств двигателя точка МТРВ смещается в область более высоких скоростей. Для графика $\xi = 8$ это ограничение наступает на максимальной скорости.

Таким образом, двигатель с *выступающими* магнитами значительно уступает по перегрузочной способности двигателю со *встроенными* магнитами.

Пульсации момента и энергетические показатели

Момент, развиваемый СДПМ, характеризуется также такими составляющими, как зубцовый момент и момент гармоник [21], которые обуславливают пульсации момента. Структура ротора в определенной степени влияет на эти составляющие.

Зубцовый момент для ротора с поверхностными магнитами выше примерно в 2 раза по сравнению с двумя другими типами роторов – 1 и 0,5 % от номинального момента соответственно [22, 23].

Зависимость момента гармоник от структуры ротора незначительна и определяется в основном магнитной цепью статора и эксцентриситетом ротора, вызванным неточностью производственного процесса.

Потери в стали ротора и потери на вихревые токи в магнитах, определяющие КПД двигателя, при различных структурах ротора отличаются незначительно. Лишь потери на вихревые токи в магнитах при

отсутствии нагрузки в роторах с выступающими и вставными магнитами заметно больше, чем в роторах с встроенными магнитами. Однако при наличии нагрузки эта разница нивелируется [22]. Также потери на вихревые токи в магнитах можно уменьшить применением сегментирования магнитов в двух направлениях [20].

Коэффициент нагрузки ($\cos\phi$) в большей степени определяется приводом (инвертором), без которого СДПМ не применяется. Наличие корректора коэффициента мощности позволяет улучшить энергетические показатели привода [24].

Заключение

Магнитные структуры роторов напрямую влияют на характеристики синхронных двигателей с постоянными магнитами, в которых они применяются. Сложность процесса производства таких роторов определяет их стоимость и целесообразность применения в различных областях.

Наличие реактивного момента в роторах со вставными и встроенными магнитами вносит дополнительную составляющую в уравнения управления СДПМ. Так, оптимальный угол тока статора зависит от соотношения индуктивностей по осям d , q .

Ведутся также разработки в области применения «беличьей клетки», встроенной в ротор СДПМ [25, 26] в качестве демпферной обмотки и в области использования сверхпроводниковых материалов [27].

Поскольку энергетические показатели СДПМ с разными структурами ротора различаются незначительно, выбор той или иной конструкции для конкретного применения определяется необходимыми характеристиками привода и стоимостными показателями. Наиболее важный критерий выбора – перегрузочная способность, которая выше у двигателя со встроенными магнитами ввиду неоднородности структуры его ротора.

Стоит также отметить, что синхронные двигатели с постоянными магнитами выполняют, как правило, 6- и 8-полюсными [28]], так как при такой конфигурации достигается максимальный момент.

Для двигателей с выступающими магнитами характерен также такой недостаток, как неконтролируемый переход в генераторный режим при неисправности инвертора, в процессе чего возникают значительные перенапряжения. СДПМ со встроенными магнитами лишены этого недостатка из-за их анизотропной структуры [20].

Данная работа выполнена с целью обзора возможных вариантов приводных двигателей для системы наведения солнечных батарей. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы для выбора типа привода такой системы и ее оптимизации по энергетическим и экономическим критериям.

Библиографический список

1. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа: Логос, 2000. – 607 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2010. – 350 с.
3. New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe (Invited) / Masato Sagawa, Setsuo Fujimura, Norio Togawa, Hitoshi Yamamoto, Yutaka Matsuura // *Journal of Applied Physics*. – 1984. – 55. – P. 2083–2087. DOI: 10.1063/1.333572
4. Gieras J.F. Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications. – 3th ed. – Florida, USA: CRC Press, 2009. – 616 p.
5. Schwarz B. Converter-Fed Synchronous Machine with High Performance Dynamic Behaviour for Servo-Drive Application // *IFAC Proceedings Volumes*. – September 1983. – Vol. 16, iss. 16. – P. 375–382. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)61892-5
6. Lajoie-Mazenc M., Villanueva C., Hector J. Study and Implementation of Hysteresis Controlled Inverter on a Permanent Magnet Synchronous Machine // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – March 1985. – Vol. IA-21, no. 2. – P. 408–413. DOI: 10.1109/TIA.1985.349662
7. Корельский Д.В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами // *Радиоэлектроника, информатика, управління*. – 2001. – № 2(6). – С. 155–159.
8. Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications / Y. Yang, S. Castano, R. Yang, M. Kasprzak, B. Bilgin, A. Sathyan, H. Dadkhah, A. Emadi // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – March 2017. – Vol. 3, no. 1. – P. 86–97. DOI: 10.1109/TTE.2016.2614972
9. Position Sensorless Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Machine Drives / G. Wang [et al.]. – Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. – 305 p. DOI: 10.1007/978-981-15-0050-3

10. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / Иванов. гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 2008. – 298 с.
11. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
12. A new design concept of permanent magnet machine for flux weakening operation / Longya Xu, Lurong Ye, Li Zhen, A. El-Antably // IEEE Transactions on Industry Applications. – March-April 1995. – Vol. 31, no. 2. – P. 373–378. DOI: 10.1109/28.370287
13. Гельвер Ф.А. Конструкции реактивных электрических машин. Характеристики, достоинства и недостатки // Труды Крыловского гос. науч. центра. – 2020. – Т. 1, № 391. – С. 140–150. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-140-150
14. George Ellis. Control System Design Guide. A Practical Guide. – Academic Press, 2004. – 464 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-237461-6.X5000-0
15. Балковой А.П. Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 328 с.
16. Sebastian T., Slemmon G.R. Operating Limits of Inverter-Driven Permanent Magnet Motor Drives // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1987. – Vol. IA-23, no. 2. – P. 327–333. DOI: 10.1109/TIA.1987.4504909
17. Optimum machine parameters and design of inverter-driven synchronous motors for wide constant power operation / S. Morimoto, M. Sanada, Y. Takeda, K. Taniguchi // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Denver, CO, USA. – 1994. – Vol. 1. – P. 177–182. DOI: 10.1109/2943.541242
18. Справочная система SimInTech [Электронный ресурс]. – URL: <https://help.simintech.ru/> (дата обращения: 17.03.2021).
19. Staton D., Miller T.J.E., Wood S.E. Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor // Electric Power Applications, IEE Proceedings B. – 1993. – P. 249–259. DOI: 10.1049/ip-b.1993.0031
20. Vagati A., Pellegrino G., Guglielmi P. Comparison between SPM and IPM motor drives for EV application // The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010. – 2010. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607911
21. Томасов В.С., Ловлин С.Ю., Егоров А.В. Алгоритмы компенсации пульсаций момента прецизионного электропривода на базе синхронной машины с постоянными магнитами // Научно-технический

вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2(84). – С. 77–83.

22. Jagasics S., Vajda I. Comparison of different PMSM rotor configurations // IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), Florence. – 2014. – P. 1–5. DOI: 10.1109/IEVC.2014.7056196

23. Guo S., Guo H., Xu J. Design and Comparison of Six-Phase Fault-Tolerant Interior Permanent Magnet Motor and Surface-Mounted Permanent Magnet Motor for Electric Vehicles // 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – 2018. – P. 120–125. DOI: 10.23919/icems.2018.8549067

24. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. – М.: Техносфера, 2011. – 576 с.

25. Структура ротора с двойной клеткой для улучшенной синхронизации синхронных двигателей с постоянными магнитами / Hongbo Qiu, Yong Zhang, Cunxiang Yang, Ran Yi // Технічна електродинаміка. – 2020. – № 1. – С. 40–47. DOI: 10.15407/techned2020.01.040

26. Zöhra B., Akar M., Eker M. Design of A Novel Line Start Synchronous Motor Rotor // Electronics. – 2019. – Vol. 8. – 25 p. DOI: 10.3390/electronics8010025

27. Высокодинамичные электрические машины с постоянными магнитами и массивными высокотемпературными сверхпроводниковыми элементами / А.В. Левин, П.С. Васич, Д.С. Дежин, Л.К. Ковалев, К.Л. Ковалев, В.Н. Полтавец, В.Т. Пенкин // Электричество. – 2012. – № 2. – С. 2–10.

28. Vagati A. Advanced Motor Technologies: Synchronous Motors and Drives. – Springer, 1997. – 25 p. DOI: 10.1007/978-3-642-60832-2_18

References

1. Kopylov I.P. Elektricheskie mashiny [Electrical machines]. 2nd ed. Moscow: Vysshaia shkola: Logos, 2000, 607 p.

2. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electrical machines. AC machines]. Saint Petersburg: Piter, 2010, 350 p.

3. Masato Sagawa, Setsuo Fujimura, Norio Togawa, Hitoshi Yamamoto, Yutaka Matsuura New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe (Invited). *Journal of Applied Physics*, 1984, 55, pp. 2083-2087. DOI: 10.1063/1.333572

4. Gieras J.F. Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications. 3th ed. Florida, USA: CRC Press, 2009, 616 p.
5. Schwarz B. Converter-Fed Synchronous Machine with High Performance Dynamic Behaviour for Servo-Drive Application. *IFAC Proceedings Volumes*. September 1983, vol. 16, iss. 16, pp. 375-382. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)61892-5
6. Lajoie-Mazenc M., Villanueva C., Hector J. Study and Implementation of Hysteresis Controlled Inverter on a Permanent Magnet Synchronous Machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March 1985, vol. IA-21, no. 2, pp. 408-413. DOI: 10.1109/TIA.1985.349662
7. Korel'skii D.V., Potapenko E.M., Vasil'eva E.V. Obzor sovremennykh metodov upravleniia sinkhronnymi dvigateliami s postoiannymi magnitami [Overview of modern control methods for permanent magnet synchronous motors]. *Radioelektronika, informatika, upravlinnia*, 2001, no. 2(6), pp. 155-159.
8. Yang Y., Castano S., Yang R., Kasprzak M., Bilgin B., Sathyan A., Dadkhah H., Emadi A. Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, March 2017, vol. 3, no. 1, pp. 86-97. DOI: 10.1109/TTE.2016.2614972
9. Wang G. et al. Position Sensorless Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Machine Drives. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020, 305 p. DOI: 10.1007/978-981-15-0050-3
10. Vinogradov A.B. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka [Vector control of AC drives]. Ivanovo. Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina, 2008, 298 p.
11. Anuchin A.S. Sistemy upravleniia elektroprivodov [Electric drive control systems]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2015, 373 p.
12. Xu Longya, Ye Lurong, Zhen Li, El-Antably A. A new design concept of permanent magnet machine for flux weakening operation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March-April 1995, vol. 31, no. 2, pp. 373-378. DOI: 10.1109/28.370287
13. Gel'ver F.A. Konstruktsii reaktivnykh elektricheskikh mashin. Kharakteristiki, dostoinstva i nedostatki. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2020, vol. 1, no. 391, pp. 140-150. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-140-150

14. George Ellis. Control System Design Guide. A Practical Guide. Academic Press, 2004, 464 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-237461-6.X5000-0
15. Balkovoi A.P. Tsatsenkin V.K. Pretsizionnyi elektroprivod s ventil'nymi dvigateliami [Precision electric drive with brushless motors]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2010, 328 p.
16. Sebastian T., Slemmon G.R. Operating Limits of Inverter-Driven Permanent Magnet Motor Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1987, vol. IA-23, no. 2, pp. 327-333. DOI: 10.1109/TIA.1987.4504909
17. Morimoto S., Sanada M., Takeda Y., Taniguchi K. Optimum machine parameters and design of inverter-driven synchronous motors for wide constant power operation. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Denver, CO, USA*, 1994, vol. 1, pp. 177-182. DOI: 10.1109/2943.541242
18. Spravochnaia sistema SimInTech [SimInTech Help System], available at: <https://help.simintech.ru/> (accessed 17 March 2021).
19. Staton D., Miller T.J.E., Wood S.E. Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor. *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*, 1993, pp. 249-259. DOI: 10.1049/ip-b.1993.0031
20. Vagati A., Pellegrino G., Guglielmi P. Comparison between SPM and IPM motor drives for EV application. *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, 2010, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607911
21. Tomasov V.S., Lovlin S.Iu., Egorov A.V. Algoritmy kompensatsii pul'satsii momenta pretzionnogo elektroprivoda na baze sinkhronnoi mashiny s postoiannymi magnitami [Compensation algorithms of torque ripple for precision electric drive with permanent-magnet synchronous motor]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2(84), pp. 77-83.
22. Jagasics S., Vajda I. Comparison of different PMSM rotor configurations. *IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), Florence*, 2014, pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEVC.2014.7056196
23. Guo S., Guo H., Xu J. Design and Comparison of Six-Phase Fault-Tolerant Interior Permanent Magnet Motor and Surface-Mounted Permanent Magnet Motor for Electric Vehicles. *21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2018, pp. 120-125. DOI: 10.23919/icems.2018.8549067

24. Meleshin V.I., Ovchinnikov D.A. Upravlenie tranzistornymi preobrazovateliami elektroenergii [Transistor power converters]. Moscow: Tekhnosfera, 2011, 576 p.

25. Qiu Hongbo, Zhang Yong, Yang Cunxiang, Yi Ran. Struktura rotora s dvoynoi kletkoi dlia uluchshennoi sinkhronizatsii sinkhronnykh dvigatelei s postoiannymi magnitami [Rotor structure with double cage for improved synchronous capability of line-start permanent magnet synchronous motors]. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2020, no. 1, pp. 40-47. DOI: 10.15407/techned2020.01.040

26. Zöhra B., Akar M., Eker M. Design of A Novel Line Start Synchronous Motor Rotor. *Electronics*, 2019, vol. 8, 25 p. DOI: 10.3390/electronics8010025

27. Levin A.V., Vasich P.S., Dezhin D.S., Kovalev L.K., Kovalev K.L., Poltavets V.N., Penkin V.T. Vysokodinamichnye elektricheskie mashiny s postoiannymi magnitami i massivnymi vysokotemperaturnymi sverkhprovodnikovymi elementami [Highly dynamic permanent magnet electric machines with massive high temperature superconducting elements]. *Elektrichestvo*, 2012, no. 2, pp. 2-10.

28. Vagati A. Advanced Motor Technologies: Synchronous Motors and Drives. Springer, 1997, 25 p. DOI: 10.1007/978-3-642-60832-2_18

Сведения об авторах

Попов Сергей Анатольевич (Краснодар, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета (350072, Краснодар, ул. Московская 2; e-mail: sa_porov@inbox.ru).

Кривченков Владимир Игоревич (Краснодар, Россия) – аспирант кафедры электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета (350072, Краснодар, ул. Московская 2, e-mail: vldmrkr5@ya.ru).

Асташов Максим Александрович (Краснодар, Россия) – аспирант кафедры электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета (350072, Краснодар, ул. Московская, 2, e-mail: i.am.jlaku@gmail.com).

Попова Светлана Валентиновна (Краснодар, Россия) – аспирантка кафедры электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета (350072, Краснодар, ул. Московская 2, e-mail: s.sv23@mail.ru).

About the authors

Sergey A. Popov (Krasnodar, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Electrical Engineering and Electric Machines, Kuban State Technological University (350072, Krasnodar, 2, Moskovskaya str., e-mail: sa_popov@inbox.ru).

Vladimir I. Krivchenkov (Krasnodar, Russian Federation) – Graduate Student Department of Electrical Engineering and Electric Machines, Kuban State Technological University (350072, Krasnodar, 2, Moskovskaya str., e-mail: vldmrkr5@ya.ru).

Maxim A. Astashov (Krasnodar, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University (350072, Krasnodar, 2, Moskovskaya str., e-mail: i.am.jlaku@gmail.com).

Svetlana V. Popova (Krasnodar, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University (350072, Krasnodar, 2, Moskovskaya str., e-mail: s.sv23@mail.ru).

Получено 30.10.2021