

В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, В.М. Казакбаев, С.Х. Ошурбеков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ ОДНОФАЗНЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАШИН С МАГНИТАМИ НА СТАТОРЕ

Мета. Дослідження характеристик двох високошвидкісних однофазних електричних машин з магнітами на статорі (електрична машина зі змінним напрямом потоку і гібридна вентильно-індукторна реактивна машина): порівнюються такі характеристики як ККД, вага, вартість активних матеріалів, номінальний струм елементів перетворювача частоти. **Методика.** Розрахунок характеристик електричної машини за допомогою рішення двомірних крайових магнітостатичних завдань. **Результати.** Проведено порівняння двох типів однофазних машин з магнітами на статорі; отримано розрахункове порівняння характеристик однофазної електричної машини зі змінним напрямом потоку і однофазної гібридної вентильно-індукторної реактивної машини; отримані результати порівняння маси, розмірів і ККД двох машин. **Наукова новизна.** Уперше отримані результати порівняння однофазної електричної машини зі змінним напрямом потоку і однофазної гібридної вентильно-індукторної реактивної машини. **Практичне значення.** Отримані результати можуть допомогти при виборі кращої конструкції електродвигуна в даних застосуваннях: електричне турбонаддування, побутові прилади, вентилятори, насоси і компресори малої потужності і т.д. Бібл. 15, табл. 2, рис. 13.

Ключові слова: високошвидкісні машини, гібридна вентильно-індукторна реактивна машина, машина зі змінним напрямом магнітного потоку, машина з постійними магнітами, однофазні електричні машини, спеціальні електричні машини.

Цель. Исследование характеристик двух высокоскоростных однофазных электрических машин с магнитами на статоре (электрическая машина с переменным направлением потока и гибридная вентильно-индукторная реактивная машина): сравниваются такие характеристики как КПД, вес, стоимость активных материалов, номинальный ток элементов преобразователя частоты. **Методика.** Расчет характеристик электрической машины с помощью решения двухмерных краевых магнитостатических задач. **Результаты.** Произведено сопоставление двух типов однофазных машин с магнитами на статоре; получено расчетное сравнение характеристик однофазной электрической машины с переменным направлением потока и однофазной гибридной вентильно-индукторной реактивной машины; получены результаты сравнения массы и размеров КПД двух машин. **Научная новизна.** Впервые получены результаты сравнения однофазной электрической машины с переменным направлением потока и однофазной гибридной вентильно-индукторной реактивной машины. **Практическое значение.** Полученные результаты могут помочь при выборе лучшей конструкцией электродвигателя в рассматриваемых приложениях: электрический турбонаддув, бытовые приборы, вентиляторы, насосы и компрессоры малой мощности и т.д. Библ. 15, табл. 2, рис. 13.

Ключевые слова: высокоскоростные машины, гибридная вентильно-индукторная реактивная машина, машина с переменным направлением магнитного потока, машина с постоянными магнитами, однофазные электрические машины, специальные электрические машины.

Введение. Однофазные синхронные машины с магнитами на роторе [1] и бесщеточные машины с постоянными магнитами на статоре [2-9] применяются в высокоскоростных приложениях низкой мощности, где требуется регулирование частоты вращения и невысокая стоимость.

Основное преимущество машин с магнитами на роторе по сравнению с синхронной машиной с магнитами на роторе – простой зубчатый ротор, представляющий собой шихтованный пакет стали, насаженный на вал. Это повышает надежность, упрощает технологию изготовления ротора и снижает стоимость ротора в высокоскоростных приложениях.

В [2, 3], описывается однофазная гибридная вентильно-индукторная реактивная машина (ГВИРМ, англ. «Hybrid Switched Reluctance Machine», рис. 1). Добавление постоянных магнитов на статор решает задачу начального позиционирования ротора. Следовательно, запуск двигателя возможен, даже в однофазном варианте. Кроме того, наличие магнитов на статоре, снижает массу ГВИРМ, по сравнению с ВИРМ без магнитов. Уменьшается размер и диаметр ротора ГВИРМ, что особенно важно для высокоскоростных приложений. По сравнению с однофазной синхронной машиной с магнитами на роторе ГВИРМ имеет следующие преимущества: 1) конструктивно простой и надежный зубчатый ротор; 2) в конструк-

ции ГВИРМ могут быть использованы дешевые ферриты, а в традиционной синхронной машине должны использоваться дорогие редкоземельные магниты; 3) меньшее число транзисторов в инверторе.

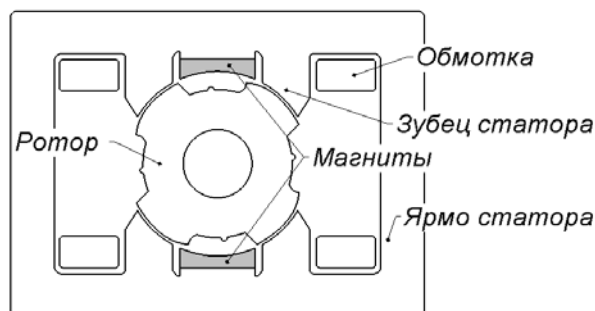


Рис. 1. Однофазная гибридная вентильно-индукторная реактивная машина [2]

Несмотря на отмеченные выше преимущества ГВИРМ, эта машина имеет следующий недостаток по сравнению с однофазной синхронной машиной с магнитами на роторе: ГВИРМ питается однополярными импульсами постоянного тока. Синхронная машина с магнитами на роторе – это машина переменного тока. Поэтому для достижения тока с той же амплитудой (полуразмахом) в случае ГВИРМ требуется, чтобы ток имел значительно большее по модулю значение.

© В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, В.М. Казакбаев, С.Х. Ошурбеков

Таким образом, действующее и максимальное значение тока в фазе ГВИРМ намного больше, чем у аналогичной однофазной синхронной машины с магнитами на роторе. В связи с этим возрастает стоимость и габариты преобразователя частоты для ГВИРМ, а также возрастают потери в преобразователе частоты.

Хорошей альтернативой ГВИРМ и традиционной однофазной синхронной машине с магнитами на роторе может быть однофазная электрическая машина с переменным направлением потока (ЭМПНП, англ. «Flux Reversal Machine»). Однофазная ЭМПНП с тремя зубцами на роторе и четырьмя магнитными полюсами на статоре (рис. 2) была впервые описана в [4].

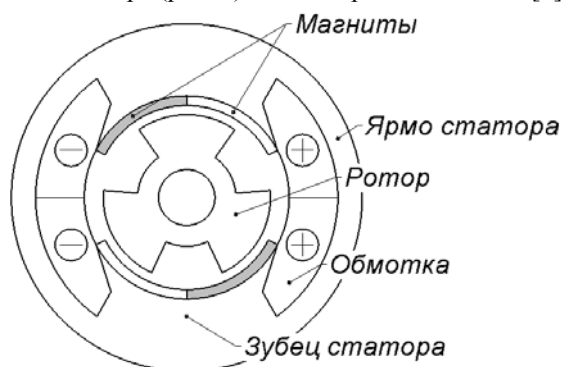


Рис. 2. Конструкция ЭМПНП согласно [4]

Однофазная ЭМПНП имеет простой и зубчатый ротор, как и ГВИРМ. Размещение постоянных магнитов на статоре ЭМПНП обеспечивает простоту конструкции и надежность, а также малую массу и габариты. В то же время ЭМПНП – это машина переменного тока, как и синхронная машина с магнитами на роторе. Импульсы тока разной полярности в ЭМПНП могут занимать значительную часть периода. Поэтому действующее и максимальное значение тока в фазе ЭМПНП меньше, чем для ГВИРМ. Это позволяет применить для ЭМПНП преобразователь частоты, в котором основные силовые элементы имеют меньшее значение действующего и максимального тока. Также в преобразователе частоты для ЭМПНП меньше потери энергии, чем для ГВИРМ, а, следовательно, меньше размеры радиатора и общие габариты.

Однако у конструкции ЭМПНП, описанной в [4] имеются следующие недостатки: 1) снижение удельной мощности и КПД, поскольку не используется треть внутренней поверхности статора; 2) отсутствие симметрии машины на промежутке вращения 180° вызывает нескомпенсированные радиальные усилия, действующие на ротор; 3) эти нескомпенсированные радиальные силы снижают ресурс работы подшипников. Для преодоления отмеченных выше недостатков ЭМПНП, описанного в [4], в патенте [5] и работах [6, 7] была предложена однофазная ЭМПНП, изображенная на рис. 3.

В ЭМПНП (рис. 3) используется вся поверхность статора за счет использования полузакрытых пазов. ГВИРМ же имеет открытые пазы статора, что снижает удельный момент и КПД в сравнении с ЭМПНП.

Несмотря на отмеченные выше недостатки ГВИРМ, по сравнению с ЭМПНП, в конструкции ГВИРМ могут быть использованы дешевые ферритовые магниты [3], в то время как для ЭМПНП могут быть использованы только редкоземельные магниты.

Это достоинство ГВИРМ может быть особенно важным при проектировании приводов невысокой стоимости для бытовых приборов, электроинструмента, автомобильной промышленности, воздуходувок и т.д.

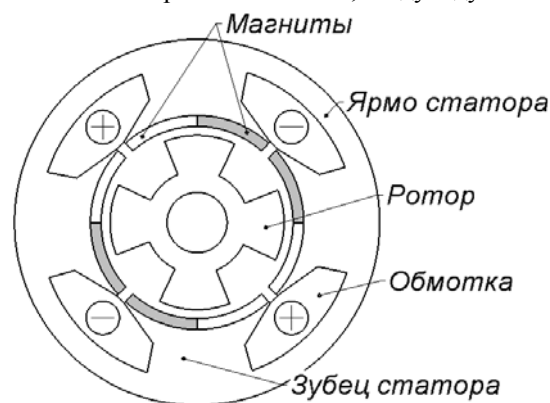


Рис. 3. Конструкция ЭМПНП согласно [5, 6]

Сопоставление разных типов электрических машин по массе и стоимости активных материалов, КПД имеет большое значение при выборе типа привода для различных приложений, как это показано на примере трёхфазных машин [10-12]. Как показывает обзор литературных источников, сопоставление высокоскоростных ЭМПНП и ГВИРМ не описано в литературе, поэтому подобное сопоставление является актуальным и новым при выборе типа привода для однофазных высокоскоростных приложений.

Цель работы – исследование характеристик двух типов однофазных высокоскоростных электрических машин с магнитами на статоре – ЭМПНП и ГВИРМ. Обе машины спроектированы для маломощных приводов бытовых приборов (номинальная механическая мощность 754 Вт, номинальная частота вращения 18000 об/мин, номинальный момент 0,4 Н·м). Основные характеристики и данные для ГВИРМ взяты из [2]. ЭМПНП спроектирована на основе методики, описанной в [8]. Для обеих машин производится сопоставление по КПД и по массе активных материалов. Анализируются преимущества и недостатки однофазных ЭМПНП и ГВИРМ.

Моделирование и расчет характеристик ЭМПНП. Моделирование и расчет характеристик ЭМПНП выполнен с помощью метода конечных элементов на основе методики, описанной в [9]. Методика построена на решении магнитостатических краевых задач, с различным положением ротора, соответствующим разным моментам времени. Все эти краевые задачи имеют одну и ту же расчётную область, разделённую на две подобласти посередине воздушного зазора. Вращение учитывается граничным условием, сшивающим эти подобласти в соответствии с поворотом ротора [6]. Диаметр пакета статора ЭМПНП выбран существенно меньше, чем у ГВИРМ и равен 51 мм. Длина пакета была выбрана равной 30 мм, как у ГВИРМ. Для ЭМПНП были выбраны редкоземельные магниты с магнитной индукцией 1,2 Тл. Частота питания основной гармоники тока ЭМПНП равна 1200 Гц, как и для ГВИРМ.

На рис. 4. показано распределение модуля магнитной индукции для ЭМПНП. Зубец ротора находится над серединой паза статора.

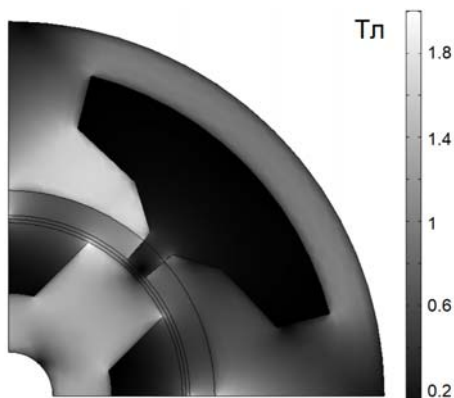


Рис. 4. Модуль магнитной индукции для ЭМПНП при моменте 0,4 Н·м

На рис. 5,а приведены расчётные величины потерь в меди P_{cu} , магнитопроводах статора P_{st} и ротора P_{rt} , а также в магнитах P_{magn} для ЭМПНП для номинальной частоты вращения (18000 об/мин) при разных значениях нагрузочного момента: 1) механическая мощность 188,5 Вт, момент 0,1 Н·м; 2) механическая мощность 377 Вт, момент 0,2 Н·м; 3) механическая мощность 565 Вт, момент 0,3 Н·м; 4) механическая мощность 754 Вт, момент 0,4 Н·м (номинальный режим). Прочие потери (в подшипниках и вентиляционные) предполагались равными 15 Вт при номинальной частоте вращения. Наибольшие потери ЭМПНП во всех режимах сосредоточены в обмотке.

На рис. 5,б изображены мгновенные значения токов ЭМПНП для разных значений момента. Моменты начала и конца положительного импульса напряжения обозначены «on+» и «off+» соответственно. Моменты начала и конца отрицательного импульса напряжения обозначены «on-» и «off-» соответственно. Из графиков видно, что ток кусочно-гладкий с изломами в моментах переключений.

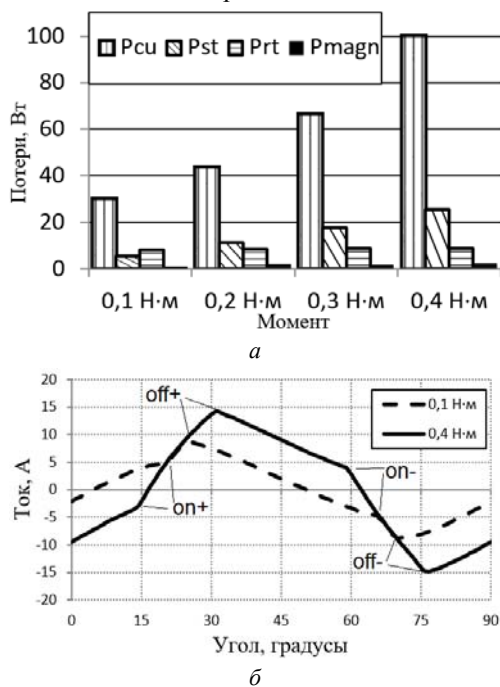


Рис. 5. Потери ЭМПНП на номинальной частоте вращения при различных моментах нагрузки (а) и зависимость тока от позиции ротора (б)

На рис. 6,а приведена зависимость коэффициента заполнения импульсов питающего напряжения (доля электрического периода, занятая импульсами напряжения той или иной полярности) от среднего значения момента ЭМПНП. При возрастании требуемой величины момента, коэффициент заполнения увеличивается линейно. Зависимость действующего значения тока от среднего момента ЭМПНП показана на рис. 6,б. Действующее значение тока нелинейно растет с увеличением момента. Остальные характеристики для ЭМПНП приведены в следующем разделе, в сравнении в ГВИРМ.

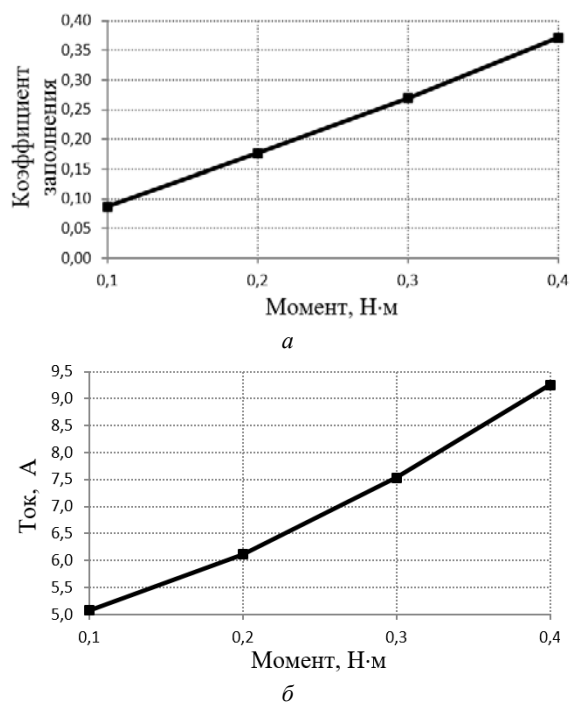


Рис. 6. Зависимость коэффициента заполнения (а) и действующего значения тока (б) от момента ЭМПНП

Сопоставление характеристик ЭМПНП и ГВИРМ. В табл. 1, 2 приведены основные характеристики однофазных ЭМПНП и ГВИРМ (номинальная механическая мощность 754 Вт, номинальная частота вращения 18000 об/мин).

Цена за 1 кг постоянных магнитов зависит не только от материала, но и от размера используемых блоков [13, 14]. Цена на NeFeB-магниты необходимого размера для ЭМПНП составляют 137,78 \$/кг [13]. Цена на ферритовые магниты необходимого размера для ГВИРМ составляют 67,20 \$/кг [14].

Как видно из табл. 2, стоимость активных материалов для ГВИРМ в 1,9 раза меньше, чем для ЭМПНП. Однако ЭМПНП в 1,8 раз меньше по массе, чем ГВИРМ. Поэтому в устройствах, которые пользователь держит в руках (например, в угловой шлифовальной машине, в дисковой пиле, в аккумуляторном электроинструменте, в садовой воздуходувке, в ручном пылесосе), а также в других приложениях, где важно снизить габариты, целесообразно применять ЭМПНП. В приложениях, где снижение массы не так важно, но важно снизить стоимость машины, например, в сушилках для рук, блендере, в торцовочной пиле, целесообразно применять ГВИРМ.

Таблица 1

Номинальные параметры ЭМ

Параметр	ЭМПНП	ГВИРМ [2]
Нагрузочный момент, Н·м	0,4	0,4
Частота основной гармоники, Гц	1200	1200
Напряжение звена постоянного тока, В	320	320
Действующее значение тока в фазе, А	9,25	17,8
Максимальное значение тока в фазе, А	14,8	34,8
КПД, %	83	72

Таблица 2

Стоимость активных материалов, масса и размеры ЭМ

Параметр	ЭМПНП	ГВИРМ [2]
Внешний размер магнитопровода статора, мм	Ø 51	78×58
Длина активной части, мм	30	30
Воздушный зазор, мм	0,5	0,5 – 1,2
Внешний диаметр ротора, мм	23,6	≈ 34
Момент инерции ротора, кг·см ²	0,041	0,205
Тип постоянных магнитов	Редкоземельные	Ферритовые*
Толщина постоянных магнитов, мм	1,7	2,4
Масса постоянных магнитов, г	28	17
Масса стали статора, г	214	494
Масса стали ротора, г	61	138
Масса меди, г	100	99
Полная масса активных материалов, г	403	731
Стоимость активных материалов, \$	4,83	2,47

* Прим. к табл. 2: в статье [5] отсутствуют данные о типе магнитов в ГВИРМ, однако в работе [3] отмечается, что для ГВИРМ применяются ферритовые магниты. При расчете стоимости активных материалов были приняты следующие цены: 1 \$/кг – для стали, 7 \$/кг – для меди [10].

Размер ротора ЭМПНП существенно меньше, чем у ГВИРМ: 1) диаметр ротора в 1,4 раза меньше; 2) масса ротора в 2,3 раза меньше; 3) момент инерции ротора в 5 раз меньше. Это преимущество ЭМПНП особенно важно для всех высокоскоростных приложений, так как позволяет существенно снизить центробежные силы, воздействующие на ротор, а также снизить нагрузку на подшипниковый узел ротора и продлить ресурс работы. Также малый момент инерции ротора очень важен в таких приложениях как электрический турбонаддув [15], так как позволяет повысить скорость реакции на сигнал задания и существенно улучшить динамические характеристики систем турбонаддува бензиновых и дизельных двигателей внутреннего сгорания.

На рис. 7 представлены значения КПД ЭМПНП и ГВИРМ для частоты вращения 18000 об/мин.

ЭМПНП имеет более высокое значение КПД, а это означает меньшие потери, меньший нагрев обмотки и более продолжительный режим работы при перегрузках по моменту и мощности.

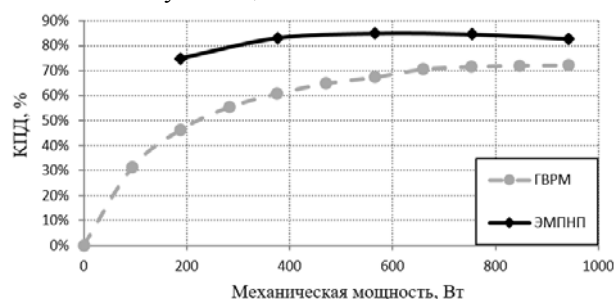


Рис. 7. Сравнение КПД ЭМПНП и ГВИРМ

На рис. 8 показаны значения момента ЭМПНП и ГВИРМ в зависимости от угла поворота машины. Момент ЭМПНП имеет область отрицательных значений и более высокую величину пульсаций момента, в сравнение с ГВИРМ. Однако пульсации момента ЭМПНП могут быть существенно уменьшены в результате оптимизации геометрии машины и могут быть сопоставимы с ГВИРМ.



Рис. 8. Сравнение графиков момента рассматриваемых машин

На рис. 9-11 приведены мгновенные значения напряжения, токов и мощности ЭМПНП и ГВИРМ для момента 0,4 Н·м и частоты вращения 18000 об/мин.

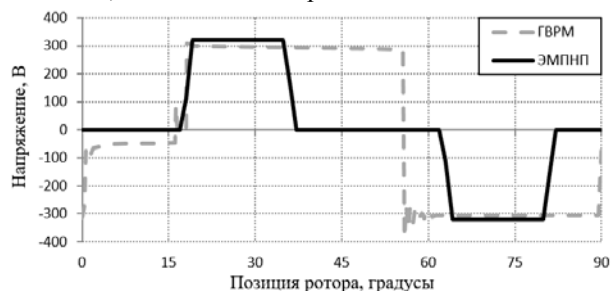


Рис. 9. Сравнение графиков напряжения машин при моменте 0,4 Н·м

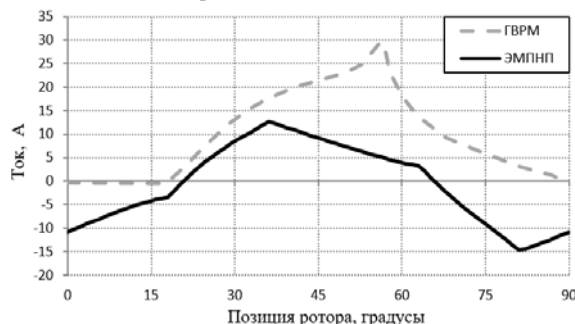


Рис. 10. Сравнение графиков тока машин при моменте 0,4 Н·м

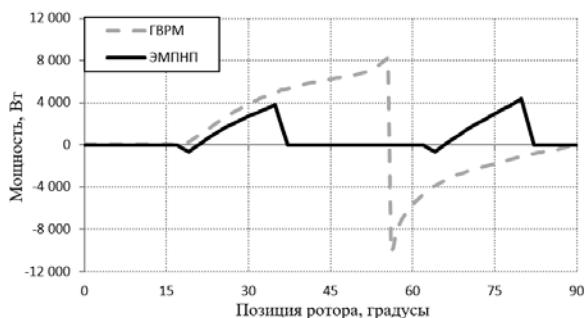


Рис. 11. Сравнение графиков электрической мощности машин при моменте 0,4 Н·м

Как видно из рис. 9-11 максимальное значение тока в фазе ЭМПНП равно 14,8 А, а у ГВИРМ – 34,8 А. Действующее значение тока в фазе ЭМПНП равно 9,25 А, а у ГВИРМ – 17,8 А. Максимальное значение потребляемой мгновенной мощности ЭМПНП от преобразователя частоты равно 4,4 кВт, а для ГВИРМ – 9,8 кВт. Среднее значение потребляемой мгновенной мощности ЭМПНП от преобразователя частоты равно 908 Вт, а для ГВИРМ – 1047 Вт. Преобразователь частоты для ГВИРМ (рис. 12) имеет меньшее число транзисторов, чем для ЭМПНП (рис. 13).

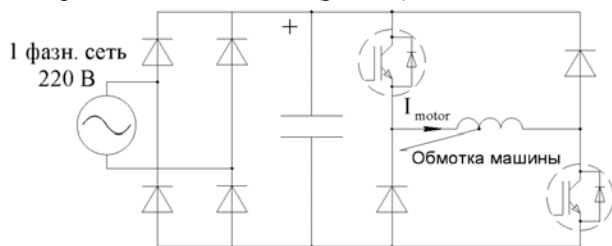


Рис. 12. Преобразователи частоты для ГВИРМ

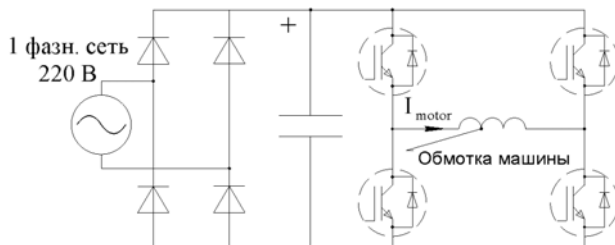


Рис. 13. Преобразователи частоты для ЭМПНП

Однако для ЭМПНП нужны силовые элементы с меньшим максимальным значением тока и радиатор охлаждения меньшего размера. Также для ГВИРМ требуется конденсатор большей емкости в звене постоянного тока, так как максимальное значение мгновенной мощности, потребляемой инвертором из звена постоянного тока в несколько раз больше, чем для ЭМПНП. Поэтому представляет интерес сопоставление потерь мощности, стоимости, массы и размеров преобразователей частоты для ЭМПНП и ГВИРМ. Проектирование и сопоставление преобразователей частоты для ЭМПНП и ГВИРМ будет выполнено в следующих работах.

Выводы.

1. В статье произведено сопоставление двух типов однофазных машин с магнитами на статоре. ЭМПНП имеет существенно более высокое значение КПД, чем ГВИРМ, а, следовательно, и меньший нагрев обмотки.

2. Стоимость активных материалов для ГВИРМ в 1,9 раза меньше, чем для ЭМПНП. Однако ЭМПНП в 1,8 раз меньше по массе, чем ГВИРМ. Поэтому в устройствах, которые держатся в руках, например, в электроинструменте, а также в других приложениях, где важно снизить габариты, целесообразно применять ЭМПНП. В приложениях, где снижение массы не так важно, а важно снизить стоимость машины, целесообразно применять ГВИРМ.

3. Действующее значение тока в фазе ЭМПНП равно 9,25 А, тогда как действующее значение тока в фазе ГВИРМ равно 17,8 А. Поэтому для ЭМПНП нужны силовые элементы с меньшим максимальным значением тока и радиатор охлаждения меньшего размера. Также для ГВИРМ требуется больший радиатор и конденсатор большей емкости в звене постоянного тока. Несмотря на более простую схему преобразователя частоты для ГВИРМ, его масса будет больше, чем для ЭМПНП.

Результаты работы получены при поддержке средствами МОН РФ, задание № 8.9549.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bentouati S., Zhu Z., Howe D. Permanent magnet brushless DC motors for consumer products. *Proceedings of the 9th International Conference on Electrical Machines and Drives* (Conf. Publ. No. 468), pp. 118-122, Canterbury, UK, 1-3 September 1999.
2. Jeong K., Ahn J. Design and characteristics analysis of a novel single-phase hybrid SRM for blender application. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2018, vol. 13, no. 5, pp. 1996-2003. doi: 10.5370/JEET.2018.13.5.1996.
3. Torok V., Loreth K. The world's simplest motor for variable speed control? The Cyrano motor, a PM-biased SR-motor of high torque density. *Proceedings of the 1993 5th European Conference on Power Electronics and Applications*, Brighton, UK, 13-16 Sept. 1993.
4. Deodhar R.P., Andersson S., Boldea I., Miller T.J.E. The flux-reversal machine: a new brushless doubly-salient permanent-magnet machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, vol. 33, no. 4, pp. 925-934. doi: 10.1109/28.605734.
5. Дмитриевский В.А., Прахт В.А. Однофазная электрическая машина. Патент RU № 2524144. Дата публикации: 27.07.2014.
6. Dmitrievskii V., Prakht V., Pozdeev A., Klimarev V., Mikhailitsyn A. Angular grinder with new flux reversal motor. *Proceedings of the 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1366-1371, Pattaya, Thailand, 25-28 October 2015.
7. Dmitrievskii V.A., Prakht V.A. Mathematical simulation of a high-speed single-phase machine with alternating current direction. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 6, pp. 327-332. doi: 10.3103/s1068371216060043.
8. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V., Sarapulov S. Steady-state model of a single-phase flux reversal motor. *Proceedings of 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2017)*, pp. 1-5, Riga, Latvia, 12-13 October 2017.
9. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V., Sarapulov S. Optimal design of a high-speed single-phase flux reversal motor for vacuum cleaners. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 12, p. 3334. doi: 10.3390/en1123334.
10. Goss J., Popescu M., Staton D. A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application. *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2013 IEEE International, pp. 220-225, Chicago, IL, USA, 12-15 May 2013. doi: 10.1109/iemdc.2013.6556256.

11. Rahman T., Mohammadi M.H., Humphries K., Lowther D.A. Comparison of fractional-slot concentrated winding and PM-assisted synchronous reluctance motors for class IV electric vehicles. *Proceedings of IEEE Int. Electrical Machines and Drives Conf.* (IEMDC 2017), Miami, pp. 1-7, USA, May 2017. doi: 10.1109/iemdc.2017.8002173.
12. Calvo E., Potoradi D. Synchronous reluctance motors with and without permanent magnets for high performance low cost electrical drives. *Proceedings of 5th International Electric Drives Production Conference* (EDPC 2015), pp. 1-7, Nuremberg, Germany, 15-16 September 2015. doi: 10.1109/edpc.2015.7323220.
13. ChenYang NdFeB Magnets. Price List of Standard Block Magnets. Available at: <http://www.ndfebmagnets.de/CY-PriceList-NdFeB-Block.pdf> (accessed 05 July 2019).
14. IBSMagnet. Hard ferrite magnets. Available at: <https://ibsmagnet.com/products/dauermagnete/hartferrit.php> (accessed 05 July 2019).
15. Lee W., Kim J.H., Choi W., Sarlioglu B. Torque Ripple Minimization Control Technique of High-Speed Single-Phase Brushless DC Motor for Electric Turbocharger. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, vol. 67, no. 11, pp. 10357-10365. doi: 10.1109/tvt.2018.2866779.

REFERENCES

1. Bentouati S., Zhu Z., Howe D. Permanent magnet brushless DC motors for consumer products. *Proceedings of the 9th International Conference on Electrical Machines and Drives* (Conf. Publ. No. 468), pp. 118-122, Canterbury, UK, 1-3 September 1999.
2. Jeong K., Ahn J. Design and characteristics analysis of a novel single-phase hybrid SRM for blender application. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2018, vol. 13, no. 5, pp. 1996-2003. doi: 10.5370/JEET.2018.13.5.1996.
3. Torok V., Loreth K. The world's simplest motor for variable speed control? The Cyrano motor, a PM-biased SR-motor of high torque density. *Proceedings of the 1993 5th European Conference on Power Electronics and Applications*, Brighton, UK, 13-16 Sept. 1993.
4. Deodhar R.P., Andersson S., Boldea I., Miller T.J.E. The flux-reversal machine: a new brushless doubly-salient permanent-magnet machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, vol. 33, no. 4, pp. 925-934. doi: 10.1109/28.605734.
5. Dmitrievskii V.A., Prakht V.A. *Odnofaznaia elektricheskaya mashina* [Single-phase electrical machine]. Patent Russian Federation, no. 2524144, 2014. (Rus).
6. Dmitrievskii V., Prakht V., Pozdeev A., Klimarev V., Mikhailitsyn A. Angular grinder with new flux reversal motor. *Proceedings of the 18th International Conference on Electrical Machines and Systems* (ICEMS), pp. 1366-1371, Pattaya, Thailand, 25-28 October 2015.
7. Dmitrievskii V.A., Prakht V.A. Mathematical simulation of a high-speed single-phase machine with alternating current direction. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 6, pp. 327-332. doi: 10.3103/s1068371216060043.
8. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V., Sarapulov S. Steady-state model of a single-phase flux reversal motor. *Proceedings of 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University* (RTUCON 2017), pp. 1-5, Riga, Latvia, 12-13 October 2017.
9. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V., Sarapulov S. Optimal design of a high-speed single-phase flux reversal motor for vacuum cleaners. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 12, p. 3334. doi: 10.3390/en1123334.
10. Goss J., Popescu M., Staton D. A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electrical vehicle application. *Electric Machines & Drives Conference* (IEMDC), 2013 IEEE International, pp. 220-225, Chicago, IL, USA, 12-15 May 2013. doi: 10.1109/iemdc.2013.6556256.
11. Rahman T., Mohammadi M.H., Humphries K., Lowther D.A. Comparison of fractional-slot concentrated winding and PM-assisted synchronous reluctance motors for class IV electric

- vehicles. *Proceedings of IEEE Int. Electrical Machines and Drives Conf.* (IEMDC 2017), Miami, pp. 1-7, USA, May 2017. doi: 10.1109/iemdc.2017.8002173.
12. Calvo E., Potoradi D. Synchronous reluctance motors with and without permanent magnets for high performance low cost electrical drives. *Proceedings of 5th International Electric Drives Production Conference* (EDPC 2015), pp. 1-7, Nuremberg, Germany, 15-16 September 2015. doi: 10.1109/edpc.2015.7323220.
13. ChenYang NdFeB Magnets. Price List of Standard Block Magnets. Available at: <http://www.ndfebmagnets.de/CY-PriceList-NdFeB-Block.pdf> (accessed 05 July 2019).
14. IBSMagnet. Hard ferrite magnets. Available at: <https://ibsmagnet.com/products/dauermagnete/hartferrit.php> (accessed 05 July 2019).
15. Lee W., Kim J.H., Choi W., Sarlioglu B. Torque Ripple Minimization Control Technique of High-Speed Single-Phase Brushless DC Motor for Electric Turbocharger. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, vol. 67, no. 11, pp. 10357-10365. doi: 10.1109/tvt.2018.2866779.

Поступила (received) 24.09.2019

Практ Владимир Алексеевич¹, к.т.н.,
 Дмитриевский Владимир Алексеевич¹, к.т.н.,
 Казакбаев Вадим Маратович¹, к.т.н.,
 Ошурбеков Сафарбек Хосабекович¹,
¹ Уральский федеральный университет,
 620002, Российская Федерация, Екатеринбург,
 ул. Мира, 19,
 e-mail: va.prakht@urfu.ru, vladimir.dmitrievsky@urfu.ru,
 vadim.kazakbaev@urfu.ru, s.oshurbekov@mail.ru

V.A. Prakht¹, V.A. Dmitrievskii¹, V.M. Kazakbaev¹,
 S.Kh. Oshurbekov¹

¹ Ural Federal University,

19, Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Comparative analysis of two high-speed single-phase electrical machines with permanent magnets on the stator.

Purpose. Single-phase machines with permanent magnets on the rotor are widely used in a variety of applications of a low rated power. When these machines are applied in high-speed applications, a retaining ring on the rotor core must be often used. However, it makes the assembly more complex and the high-speed machines become more expensive. On the other hand, machines with magnets on the stator still can be a valuable alternative due to their simple and reliable rotor design. In this paper the comparative study of performances of two single-phase electrical machines with magnets on the stator (flux reversal electrical machine and hybrid switched reluctance machine) is presented. The following performances have been compared: efficiency, weight, active materials cost, value of rated current of switches of the frequency converter. **Methodology.** Calculation of electrical machines performances using solving two-dimension boundary magnetostatics problems. **Results.** The theoretical comparison of the flux reversal electrical machine and the hybrid switched reluctance machine has been carried out; the comparison on specific torque and efficiency of the two aforementioned machines have been obtained. The flux reversal machine has a significantly higher efficiency and a fewer weight. In addition, it has a lower value of rated current. On the contrary, the cost of active materials of the hybrid switched reluctance one is much less. **Originality.** The presented results can assist in selecting the best design alternative of electrical machines in the following applications: electrical blowers, household appliances, fans, pumps and compressors of a low rated power etc. **Practical value.** The comparisons results of the flux reversal electrical machine and the hybrid switched reluctance machine has been obtained for the first time. References 15, tables 2, figures 13.

Key words: high speed machines, hybrid switched reluctance machine, flux reversal electrical machine, permanent magnet machine, single-phase electrical machine, special electrical machine.