

УДК 004.052.3

doi 10.54708/22259309_2026_13523

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ СДПМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ

Г. Р. ИБАТУЛИНА¹, К. А. БАРАБАНОВ²

¹ ibatulina.gulnur-r@net.ugatu.su, ² barabanov.ka@ugatu.su

¹⁻²ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В данной статье рассмотрен способ обеспечения отказоустойчивости электродвигателя за счет секционирования активной части электрической машины. Секционированные синхронные машины с ПМ включают в себя одно-, двух- и четырехсекционные конструкции. Для обеспечения физической изоляции и ограничения распространения возникшего отказа одна секция полюсной пары статора машины вырезается.

Ключевые слова: отказоустойчивость; секционированная электрическая машина; СДПМ.

ВВЕДЕНИЕ

В критически важных областях применения, таких как аэрокосмическая и морская промышленность, к электрическим машинам предъявляются ряд требований к надежности, отказоустойчивости и работоспособности с ограниченной мощностью в случае отказа.

Одна из стратегий обеспечения отказоустойчивости систем – изоляция места отказа и резервирование. Резервирование путем использования нескольких двигателей на одном валу позволяет увеличить выходную мощность и работоспособность в случае отказа одного из двигателей, входящих в состав электропривода.

Также для повышения отказоустойчивости систем используют секционирование – разделение системы на независимые, но связанные между собой сегменты. При возникновении отказа системы неисправный модуль можно будет исключить из работы, что позволяет минимизировать негативное влияние отказов и повысить отказоустойчивость системы.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Рассмотрим метод резервирования электрической машины путем использования нескольких ЭД на одном валу. EMRAX TWIN [1] – это СДПМ, представляющие собой двойные двигатели на одном валу, где первый двигатель должен иметь удлиненный вал, соединенный со вторым двигателем с помощью фланцевого вала, установленном на втором двигателе. Для фиксации обоих двигателей используются два кронштейна X-образной формы и четыре соединительных стержня.

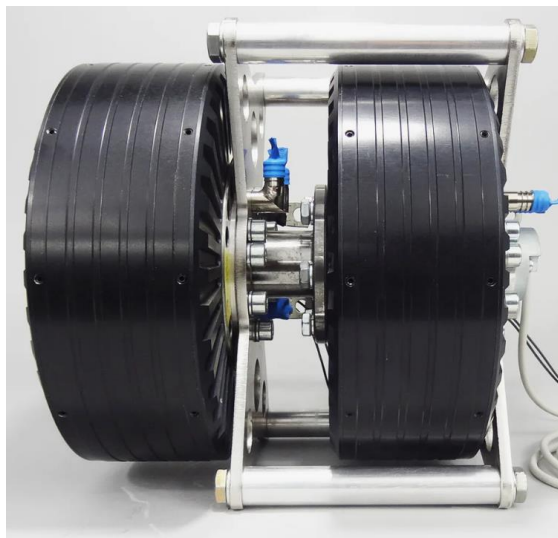


Рис. 1. Emrax Twin

Двойные двигатели обеспечивают повышенную мощность и отзывчивость, улучшение производительности и контролируемость ЛА. Бесступенчатый привод в EMRAX работает без традиционного ступенчатого редуктора, обычно необходимого в других системах.

В EMRAX для достижения высоких скоростей вращения используют ослабление магнитного поля. Этот процесс происходит, когда крутящий момент достигает максимального значения. При ослаблении магнитного поля крутящий момент снижается, но увеличивается скорость вращения, при этом мощность не меняется.

В патентах [2], [3] и в работе [4] был предложен и создан макетный образец модульного безредукторного электропривода, представленный на рис. 2. Конструкция модульного привода включает в себя сборку из трех статоров и роторов, помещенных в один корпус. СДПМ имеет обращенную конструкцию модулей, ввиду этого статора располагаются на одном валу, ротора стыкуются между собой.

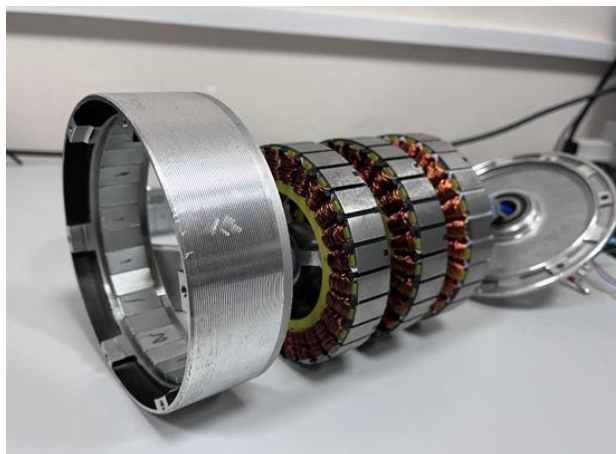


Рис. 2. Модульный безредукторный электропривод

Были проведены испытания при отключении одного и двух модулей. При отключении одного модуля максимальный момент нагрузки при частотах вращения составил 6,5 Нм. При отключении двух модулей максимальный момент нагрузки составил 3,2 Нм. Данные испытания показали отказоустойчивость системы при выходе из строя одного или двух модулей. Максимальная мощность, которую при этом может развить привод, становится меньше в 1,5 раза при отключении одного модуля и в 3 раза – при отключении 2 модулей.

В патенте [5] предложен СДПМ со статором из двухфазного материала, показанный на рис. 3. Достижение отказоустойчивости электрической машины обеспечивается дополнительной изоляцией обмотки огнеупорной пастой, которая при повышении температуры выше допустимых пределов расширяется, создает новый теплоизоляционный слой и обеспечивает возможность пожаротушения и минимизацию тепловыделений обмотки статора.

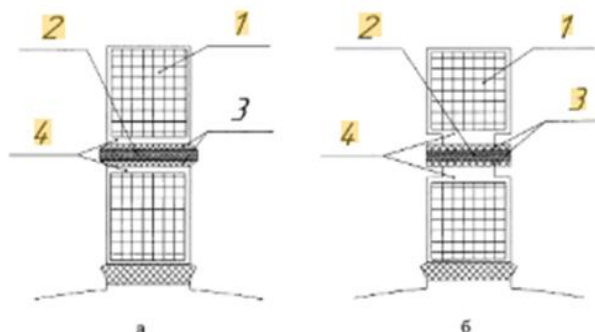


Рис. 3. Схема статора из двухфазного материала отказоустойчивой электрической машины

При протекании тока по обмотке статора 1 образуются потери, выделяющиеся в виде тепловой энергии. При возникновении неисправности обмотки происходит ее местный нагрев, при этом температура нагрева может превысить допустимые значения. В результате происходит расширение огнеупорной пасты 2 и создание нового теплоизоляционного слоя в воздушном зазоре 4 и пазовом пространстве, что позволяет снизить температуру нагрева и заблокировать возможное возгорание. Важным преимуществом заявляемого изобретения является минимизация тепловыделений обмотки статора и обеспечение возможности пожаротушения.

В патенте [6] предложен СДПМ, показанный на рис. 4. Отказоустойчивость ЭД обеспечивается полной электромагнитной изоляцией между катушками за счет использования концентрических обмоток, где каждая катушка намотана вокруг одного зубца статора 4, каждый паз статора занят одной стороной катушки, а немагнитные зоны 5, образованные в зубцах статора и пересекающие спинку статора, ориентируют магнитный поток таким образом, чтобы он не проходил через соседний паз. Магнитопровод статора частично выполнен из двухфазного материала.

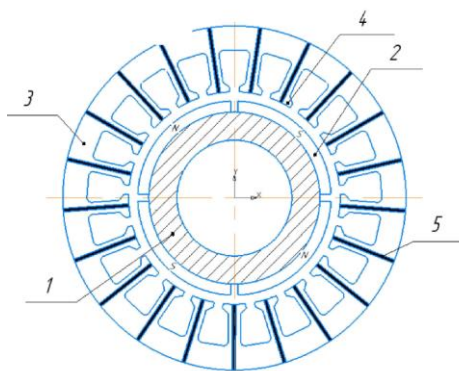


Рис. 4. Отказоустойчивая электрическая машина со статором из двухфазного материала

При работе электрической машины магнитопровод статора 3 с обмоткой пронизывается осевыми и радиальными потоками, создаваемыми постоянными магнитами 2 на роторе 1. Проходя через воздушный рабочий зазор и концентрические обмотки, магнитный поток попадает в магнитопровод статора и ориентируется так, чтобы замыкаться через части зубцов, ограничивающие паз, и ограниченные немагнитными зонами 5, и не пересекаться с магнитным

потокосом соседнего паза. Таким образом исключается возможность прохождения магнитного потока в зону других катушечных групп магнитопровода статора при возникновении межвитковых замыканий.

В статье [7] представлены новые секционированные отказоустойчивые СДПМ, которые включают в себя одно-, двух- и четырехсекционные конструкции, где одна секция полюсной пары статора машины вырезается для удовлетворения ограничений по отказоустойчивости. Проводится подробный электромагнитный анализ их электромагнитных характеристик, которые затем сравниваются с эталонной комбинацией 30s/10p для заданной выходной мощности 50 кВт.

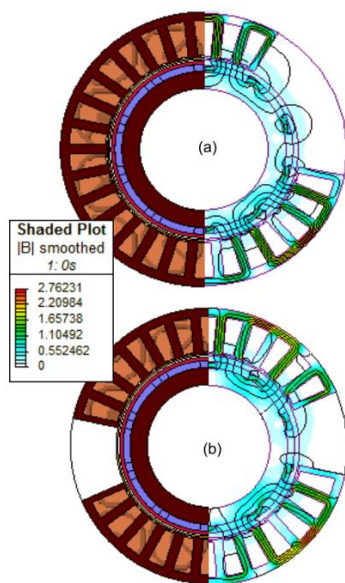


Рис. 5. Радиальное сечение и разделение потока для секционных (а) и двухсекционных машин (b) с ПМ

Радиальное сечение и распределение потока для односекционных и двухсекционных машин с ПМ показаны на рис. 5 а и на рис. 5 б соответственно. Из рис. 5 хорошо видно, что поток утечки, возникающий в местах создания секторов, приводит к увеличению пульсаций крутящего момента. Это также проиллюстрировано на рис. 6, где представлен крутящий момент каждой машины и проведено сравнение с эталонной машиной. По графику видно, что выходной крутящий момент снижается примерно до 20 % от крутящего момента эталонной машины из-за удаления полюсных пар из статора.

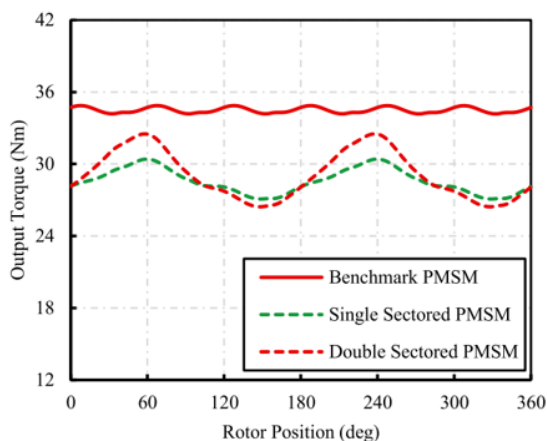


Рис. 6. Сравнение крутящего момента при полной нагрузке эталонной машины и новых секторных машин

Сравнение среднего крутящего момента и связанных с ним пульсаций крутящего момента для всех трех конструкций машин от лучшего до худшего и невозможного показано в таблице, где «++», «+», «-», «- -», «х» – это лучшие, хорошие, плохие, худшие и невозможные показатели соответственно.

Таблица

Сравнение эталонной машины и новых секционных машин

Конструкция машины	Пульсации крутящего момента	Магнитное разъединение	Физическая изоляция	Тепловое разъединение	Радиальные силы
Эталонная машина	++	х	- -	х	++
Односекционная ПМСМ	-	- -	- -	х	- -
Двухсекционная ПМСМ	- -	++	++	+	++
Четырехсекционная ПМСМ	+	++	++	+	++

Средний крутящий момент односекционных и двухсекционных машин ПМ составляет 28,6 Нм и 29 Нм соответственно, по сравнению с 35 Нм для эталонных машин. Процентная пульсация крутящего момента для односекционной и двухсекционной машин составляет 11,6 и 20,9 % соответственно, что значительно выше 2 %, наблюдаемых в эталонной машине. Эта пульсация крутящего момента может быть улучшена либо путем применения различных методов управления, либо путем изменения физической схемы машины.

Чтобы уменьшить пульсации момента с точки зрения дизайна, двухсекционная синхронная машина с ПМ была дополнительно разделена на четыре сектора вместо двух. Каждый сектор четырехсекционной ПМ-машины физически разделен на 90 градусов. Следовательно, она может питаться от двух инверторов, каждый из которых питает два сектора, расположенных на расстоянии 180 градусов друг от друга, что делает ее жизнеспособным вариантом для отказоустойчивой системы электропривода. Пульсации крутящего момента четырехсекционной машины с ПМ, а также эталонной машины с ПМ, односекционной и двухсекционной синхронных машин с ПМ можно видеть на рис. 7.

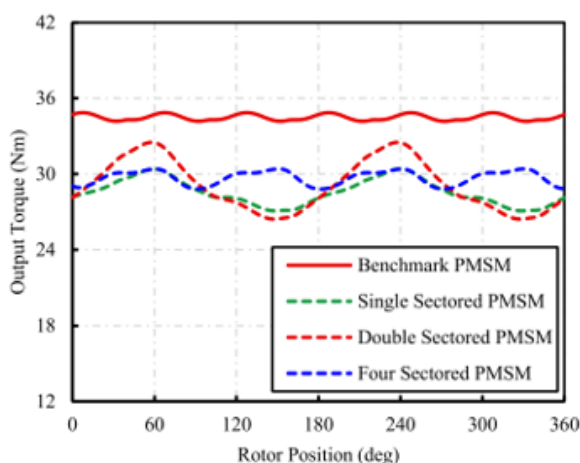


Рис. 7. Сравнение радиальных сил статора и ротора секционированных синхронных машин с ПМ

Пульсации крутящего момента в четырехсекционной ПМ-машине значительно уменьшились до 5,2 %, что сопоставимо с 2 % пульсаций крутящего момента эталонной машины без секторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подход с использованием секционирования ЭМ является перспективным. Разделение обмотки статора на секции обеспечит отказоустойчивость и ремонтпригодность электрической машины путем быстрой замены отказавшего сектора. Это достигается за счёт сегментированной конструкции статора и возможности изолированного управления каждой фазой. Секционирование электрической машины позволяет разделить фазы в обмотке по модулям, что даёт возможность изготавливать обмотки многофазными. Это, в свою очередь, снижает пульсации момента на валу генератора и повышает эффективность электрического преобразователя. Преимуществом также являются магнитная и физическая изоляция при возникновении отказа и недопущение возгорания двигателя при межвитковом КЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. STACKED MOTOR – EMRAX TWIN [Electronic resource]. – URL: <https://emrax.com/e-motors/stacked-motor/> (accessed: 05.04.2025)
2. High-torque Electric Motor Assembly [Electronic resource]. – URL: <https://patents.google.com/patent/US20200381984A1/en> (accessed: 05.04.2025)
3. Модульная машина для безредукторного высокомоментного привода [Electronic resource]. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2731017C1/ru> (accessed: 05.04.2025)
4. Разработка модульного безредукторного электропривода для воздушного винта электрического самолета / К. А. Барабанов: дис...канд. технических наук [Electronic resource]. – URL: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-modulnogo-bezreduktornogo-elektroprivoda-dlya-vozdushnogo-vinta-elektricheskogo> (accessed: 05.04.2025)
5. Статор отказоустойчивой электрической машины [Electronic resource]. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2755922C1/ru> (accessed: 05.04.2025)
6. Отказоустойчивая электрическая машина со статором из двухфазного материала [Electronic resource]. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2753739C1_20210823 (accessed: 05.04.2025)
7. Fault-Tolerant Dual Channels Three-Phase PMSM for Aerospace Applications [Electronic resource]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/383561089_Fault-Tolerant_Dual_Channels_ThreePhase_PMSM_for_Aerospace_Applications (accessed: 05.04.2025)

ОБ АВТОРАХ

ИБАТУЛИНА Гульнур Рафкатовна, студ. каф. электромеханики ПИШ «Моторы будущего» УУНИТ.

БАРАБАНОВ Кирил Андреевич, к.т.н, ассистент каф. электромеханики ПИШ «Моторы будущего» УУНИТ.

METADATA

Title: Ensuring fault tolerance of the PMSM using sectioning

Author: G. R. Ibatulina¹, K. A. Barabanov²

Affiliation:

^{1,2} Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ ibatulina.gulnur-r@net.ugatu.su, ² barabanov.ka@ugatu.su

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (35), pp. 23-28, 2026. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: This article discusses a method for ensuring fault tolerance of an electric motor by sectioning the active part of an electric machine. Sectioned synchronous machines with PM include single-, double- and four-section designs. To ensure physical isolation and limit the spread of a failure, one section of the pole pair of the machine stator is cut out.

Key words: fault tolerance, sectionalized electric machine, SDPM.

About authors:

IBATULINA Gulnur Rafkatovna, student of the electromechanics department of the AES "Motors of the Future" UUST.

BARABANOV Kiril Andreevich, PhD, assistant of the electromechanics department of the AES "Motors of the Future" UUST.