

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.82

Елизавета Владимировна Конюшенко

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: KoniuschenkoYV@mpei.ru

Ильяс Рахманов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: RahmanovIlias97@gmail.com

Олег Николаевич Молоканов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: MolokanovON@mpei.ru

Дмитрий Андреевич Ромашкин

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: RomashkinDA@mpei.ru

Александр Сергеевич Иванов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: IvanovAIS@mpei.ru

Юрий Михайлович Сафонов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», профессор кафедры автоматизированного электропривода, Россия, Москва, e-mail: SafonovYM@mpei.ru

Ольга Ивановна Байдакова

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», аспирант кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов, Россия, Москва, e-mail: KiselevaOI@mpei.ru

Исследование топологии электродвигателя Xiaomi Super Motor V6¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Актуальность изучения и синтеза оптимальной конструкции ротора вызвана необходимостью комплексного подхода к проектированию, учитывающего многозадачность и многокритериальность современных электродвигателей. Одним из ярких примеров прогресса является серия Xiaomi Super Motor, в связи с тем что скорость вращения ротора достигает 21 000 об/мин, что способствует быстрому разгону транспортного средства и более низкому энергопотреблению. Целью настоящего исследования является разработка математической модели и проведение экспериментальных исследований для изучения конструкции электродвигателя Xiaomi Super Motor V6.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач использованы численные методы моделирования электромагнитных полей, общие положения теории моделирования электрических машин, а также экспериментальные исследования на лабораторном образце. Моделирование осуществлялось по методу конечных элементов.

¹ Работа выполнена в рамках проекта «Разработка высокоскоростной электрической машины с улучшенными удельными показателями» при поддержке гранта Национального исследовательского университета «Московского энергетического института» (НИУ «МЭИ») на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

The work has been carried out within the framework of the project “Development of a high-speed electric machine with improved specific characteristics” with the support of a grant from the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” for the implementation of the scientific research program “Priority 2030: Technologies of the Future” in 2024–2026.

Результаты. Проведен анализ влияния конструкции ротора на выходные характеристики электрического двигателя. Осуществлено моделирование и экспериментальное исследование электродвигателя Xiaomi Super Motor V6. Получены зависимости электромагнитного момента и выходной мощности от угловой скорости вращения при ограниченном значении питающего напряжения 567 В.

Выводы. Полученные результаты могут быть применены для дальнейшего исследования топологий роторных систем научно-исследовательскими и производственными организациями, специализирующимися на разработке электрических машин.

Ключевые слова: высокооборотные электрические машины, увеличение удельной мощности, электрический транспорт

Elizaveta Vladimirovna Konyushenko

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Associate Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: KoniushenkoYV@mpei.ru

Ilyas Rakhmanov

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Postgraduate Student of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: RahmanovIlias97@gmail.com

Oleg Nikolaevich Molokanov

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Associate Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: MolokanovON@mpei.ru

Dmitry Andreevich Romashkin

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Postgraduate Student of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow e-mail: RomashkinDA@mpei.ru

Alexander Sergeevich Ivanov

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Associate Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: IvanovAIS@mpei.ru

Yuri Mikhailovich Safonov

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Professor of Automated Electric Drive Department, Russia, Moscow, e-mail: SafonovYM@mpei.ru

Olga Ivanovna Baidakova

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Postgraduate Student of Physics and Technology of Electrotechnical Materials and Components Department, Russia, Moscow, e-mail: KiselevaOI@mpei.ru

Study of the topology of Xiaomi Super Motor V6 electric motor

Abstract

Background. The relevance to study and synthesize the optimal rotor design is caused by the need for an integrated design approach that takes into account the multitasking and multi-criteria nature of modern electric motors. One of the striking examples of progress is the Xiaomi Super Motor series due to the fact that the rotor rotation speed reaches 21,000 rpm, which contributes to the rapid acceleration of the vehicle and lower energy consumption. The purpose of this study is to develop a mathematical model and conduct experimental studies to study the design of the Xiaomi Super Motor V6 electric motor.

Materials and methods. Numerical methods of modeling electromagnetic fields, general principles of the theory of modeling electric machines, as well as experimental studies on a laboratory sample have been used to solve the tasks set. The modeling has been carried out using the finite element method.

Results. The influence of the rotor design on the output characteristics of an electric motor has been analyzed. A simulation and experimental study of Xiaomi Super Motor V6 electric motor has been carried out. The dependences of the electromagnetic moment and output power on the angular velocity of rotation have been obtained with a limited supply voltage of 567 V.

Conclusions. The results obtained can be applied to further research of the topologies of rotary systems by scientific research and manufacturing companies specializing in the development of electric machines.

Key words: high-speed electric machines, increase in specific power, electric transport

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.059-065

Введение. Конструкция электрических машин играет решающую роль в обеспечении высоких эксплуатационных характеристик. Под конструкцией подразумевается не только геометрическая форма, но и комплекс функциональных, структурных и полевых параметров,

которые оказывают влияние на работу электродвигателя [1].

Современные типы высокооборотных электродвигателей могут быть классифицированы по различным признакам, однако наиболее ключевым является конструкция ротора. Исходя

из этого, можно выделить следующие основные типы роторных систем:

- роторы с постоянными магнитами (permanent magnet) [2];
- асинхронные роторы [3];
- синхронно-реактивные роторы [4];
- гибридные конструкции роторов [5, 6].

В настоящее время роторы с постоянными магнитами получили широкое распространение в высокооборотных электрических машинах в связи с высокой удельной мощностью, отсутствием в роторе электрических потерь и высоким КПД [7, 8].

Для анализа конструктивных особенностей выбран двигатель Xiaomi Super motor V6 (рис. 1). Он является одним из ярких примеров технического прогресса, в связи с тем что скорость вращения ротора достигает 21 000 об/мин, это способствует быстрому разгону транспортного средства и более низкому энергопотреблению².

Двигатель с частотой вращения 30000 об/мин не только значительно увеличивает скорость автомобиля, но и значительно снижает вес и размер двигателя, повышая удельную мощность, по заявлению президента компании BYD³.



Рис. 1. Электродвигатель Xiaomi Super Motor V6

Кроме электродвигателя Xiaomi Super Motor V6, в линейке компании представлен высокооборотный электродвигатель Super Motor Xiaomi V8s, который способен достигать номинальной частоты вращения 27200 об/мин (рис. 2).

Такой двигатель направлен на применение в электромобилях, где необходима высокая производительность при минимальном уровне энергопотребления. Благодаря использованию передовых технологий (искусственного интеллекта) для оптимизации конструкции ротора и магнитной системы в целом, двигатель Xiaomi обеспечивает не только высокую скорость вращения ротора, но и стабильную работу при различных нагрузках.

Данное решение является примером достижения высокой мощности при малых габаритных размерах, что является важным аспектом в разработке современных электроприводов.

² Xiaomi EV. HyperEngine: The next generation of electric vehicle powertrain technology [Электронный ресурс] // Официальный сайт Xiaomi EV. – URL: <https://www.xiaomiev.com/hyperengine> (дата обращения: 10.06.2025).

³ BYD. BYD unveils Super E-platform with megawatt flash charging [Электронный ресурс] // Официальный сайт BYD. – URL: <https://www.byd.com/emea/news-list/byd-unveils-super-e-platform-with-megawatt-flash-charging> (дата обращения: 19.06.2025).



Рис. 2. Xiaomi Super Motor XiaomiV8s

Параметры электродвигателя Xiaomi Super Motor V6s, выявленные в ходе исследования, представлены в таблице.

Параметры электромотора Xiaomi V6s

Наименование параметра	Значение	
Масса (без плат инвертора)	96,1 кг	
Электрические параметры		
Номинальное напряжение, В	800 В	
Номинальный ток, А	300	
Номинальный момент, Н·м	340	
Пиковый момент, Н·м	500	
Номинальная частота вращения, об/мин	5500	
Номинальная мощность, кВт	170	
Пиковая мощность, кВт	273 кВт	
Число фаз	3	
Линейная ЭДС холостого хода, действующее значение, В	98,3 В	
	при 110,62 Гц	
	76,8 В	
	при 86,43 Гц	
Обмотка		
Линейное сопротивление обмотки при комнатной температуре, мОм	Rab	36,4
	Rbc	36,3
	Rca	36,3
Фазное сопротивление обмотки при комнатной температуре, мОм	Ra	21,2
	Rb	22,8
	Rc	18,2
Линейная индуктивность обмотки при комнатной температуре (без ротора), мГн	Lab	0,322
	Lbc	0,321
	Lca	0,320
Линейная индуктивность обмотки при комнатной температуре (с ротором, наименьшая), мГн	Lab	0,542
	Lbc	0,542
	Lca	0,542
Линейная индуктивность обмотки при комнатной температуре (с ротором, наибольшая) мГн	Lab	1,269
	Lbc	1,269
	Lca	1,269
Фазная индуктивность обмотки при комнатной температуре (без ротора) мГн	Lan	0,137
	Lbn	0,137
	Lcn	0,137
Тип соединения	Звезда	
Статор		
Число полюсов, шт.	8	
Число пазов, шт.	48	
Тип обмотки	Hairpin, 7 слоев	

Окончание таблицы

Наименование параметра		Значение
Шаг обмотки, зубца	Основное	6
	С удлинением	7
	С укорочением	5
Число слоев в пазу, шт.		7
Диаметр проводника, мм		2,1 x 5,5
Внешний диаметр статора, мм		218
Внутренний диаметр статора, мм		144
Высота зубца, мм		16
Ширина зубца, мм		6
Длина наконечника зуба, мм		1
Толщина наконечника зуба, мм		0,5
Тип паза (скругление у ярма)		Трапеция
Высота ярма (спинка статора), мм		18–20 мм
Наличие скоса		нет
Длина статора, мм		150
Толщина пластины, мм		0,25
Тип удержания пластин (сварка, скобы, диски)		Диски
Тип пазовой изоляции		Бумага с пропиткой
Толщина пазовой изоляции, мм		0,15
Воздушный зазор, мм		0,5
Ротор		
Количество полюсов, шт.		8
Внешний диаметр ротора, мм		145 мм
Внутренний диаметр ротора, мм		60
Количество пакетов ротора		6
Длина магнитопровода		150 мм
Толщина пластины, мм		0,25
Тип постоянного магнита		NdFeB
Магниты первого слоя (ВхШхД)		5 x 17 x 25
Магниты второго слоя (ВхШхД)		3,8 x 12,5 x 25
Угол скоса пакетов		5 градусов (–2,5; 0; 2,5; 2,5; 0; –2,5)
Тип ротора		двухслойные V-образные магниты

Ротор электродвигателя состоит из сердечника и расположенных на его внутренней поверхности высокоэнергетических постоянных магнитов. Магниты представляют собой сегменты, что позволяет делать скос пазов на роторе для подавления высших гармоник. Их крепление производится с помощью термостойкого композитного клея, который обеспечивает надежное крепление при высоких оборотах вращения и способствует эффективному отводу тепла от магнитов. Конструкция ротора представлена на рис. 3.



Рис. 3. Ротор электродвигателя XiaomiV6s

Отверстия под установку постоянных магнитов имеют V-образную форму, а в зонах их размещения предусмотрены прорези сложной нестандартной геометрии. Указанная форма конструктивных элементов вызвана необходимостью оптимизации конструкции активной части, направленной на обеспечение требуемой плотности магнитного потока, снижение массы и повышение механической прочности конструкции ротора. Кроме того, вентиляционные отверстия имеют специальную спроектированную форму, которая увеличивает механическую прочность. Статор электрического двигателя имеет 48 пазов, в которых размещена обмотка типа Hairpin, выполненная в семислойной конфигурации. Применение нечетного числа слоев, в частности семи, является не стандартным решением, так как в большинстве случаев для Hairpin-обмоток применяют четное количество проводников. Один из слоев в каждом пазу реализован с укороченной длиной, при этом последний слой обладает увеличенной длиной, что, скорее всего, нацелено на упрощение технологических операций, например процесса сварки выводных концов обмотки. Конструкция статора электродвигателя представлена на рис. 4, а чертеж обмотки – на рис. 5.

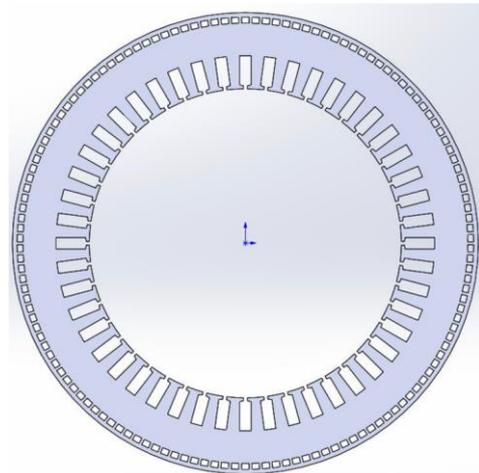


Рис. 4. Статор электромотора Xiaomi V6s

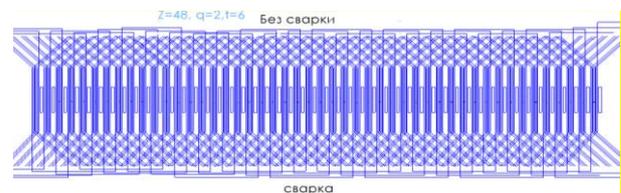


Рис. 5. Чертеж обмотки электромотора Xiaomi V6s

Методы исследования. В связи с отсутствием технической документации на исследуемый электрический двигатель был реализован комплексный подход к его изучению. Для получения первичных экспериментальных данных и последующей верификации расчетной модели

проведено предварительное испытание образца в генераторном режиме. Методика эксперимента включала механическое вращение ротора с одновременной регистрацией противоЭДС. Осциллограммы индуцированной электродвижущей силы представлены на рис. 6, 7, что дает возможность сделать качественный и количественный анализ электромагнитных процессов в исследуемом электродвигателе.

В результате экспериментального исследования электромеханических характеристик получены следующие данные: при частоте вращения вала 77 Гц зарегистрированное амплитудное значение противоЭДС достигло 97,5 В, в то время как увеличение частоты вращения до 110 Гц привело к возрастанию амплитудного значения до 140 В.

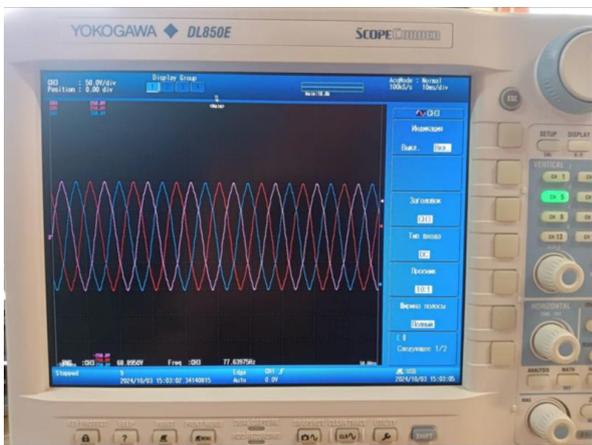


Рис. 6. Вращение электромотора на частоте 77,7 Гц

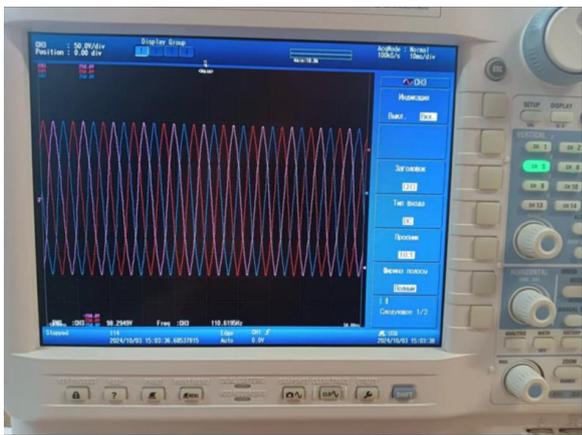


Рис. 7. Вращение электромотора на частоте 110 Гц

Для верификационного анализа разработана комплексная имитационная модель электродвигателя Xiaomi V6s и проведено исследование его работы в генераторном режиме. На рис. 8 представлена геометрия расчетной модели.

Одним из методов оптимизации вычислительных ресурсов является разделение полной геометрии на симметричные в магнитном плане сектора с соответствующими граничными условиями на линиях симметрии.

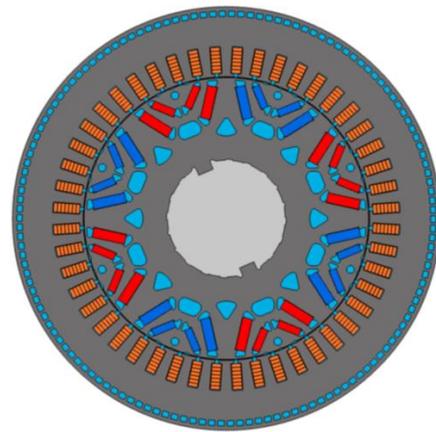


Рис. 8. Полная модель электродвигателя Xiaomi V6s

Сектор расчетной модели электродвигателя представлен на рис. 9.

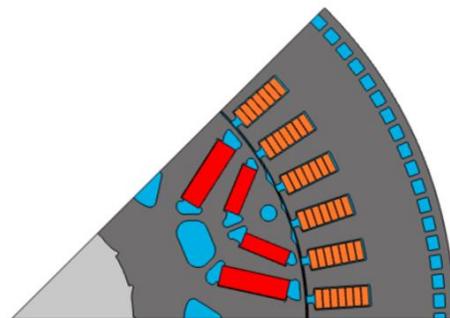


Рис. 9. 1/8 Модели электродвигателя

Граничные условия для расчета модели можно записать в следующем виде:

$$A_{src} = -A_{dst}; \quad (1)$$

$$V_{m.src} = -V_{m.dst}. \quad (2)$$

Уравнение (1) описывает распределение векторного магнитного потенциала на границе, а уравнение (2) – распределение скалярного потенциала (сохранение магнитного потока).

Результаты исследования. Результаты численного моделирования представлены на рис. 10, 11.

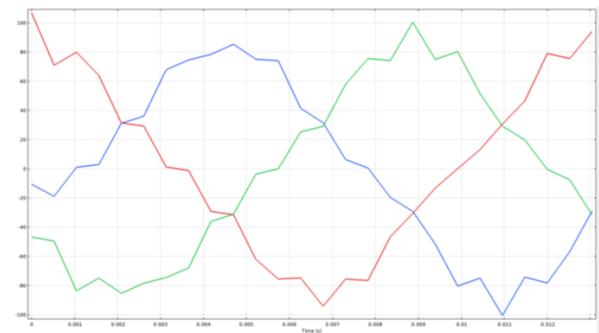


Рис. 10. Распределение ЭДС в генераторном режиме при частоте вращения 77 Гц

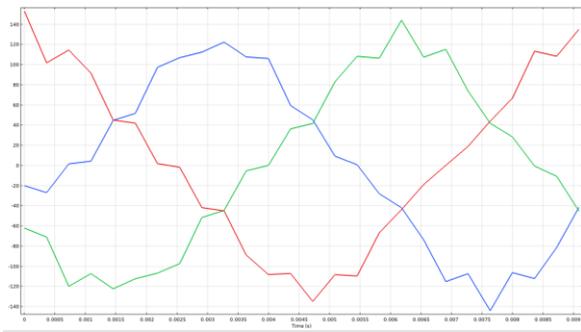


Рис. 11. Распределение ЭДС в генераторном режиме при частоте вращения 110 Гц

Сравнение с полученными экспериментальными данными подтверждает корректность и адекватность разработанной имитационной модели. Для определения предельных электромагнитных характеристик исследуемого электродвигателя проведен комплекс параметрических расчетов с изменением токовых нагрузок при фиксированной частоте вращения 1000 об/мин, что позволило определить максимальное значение тока. Результаты расчета представлены на рис. 12.

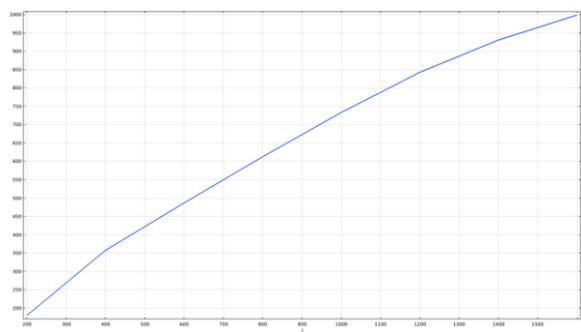


Рис. 12. Зависимость момента ротора от тока в обмотках статора

Анализ результатов расчета позволяет определить максимальное значение тока, достигающее 600 А, при этом плотность тока составляет 28 А/мм². Исходя из того, что при масляной системе охлаждения допустимая плотность тока составляет 15 А/мм², номинальный ток будет равен 300 А.

В рамках дальнейшего исследования динамических характеристик электродвигателя получены зависимости электромагнитного момента и выходной мощности от угловой скорости вращения при ограниченном значении питающего напряжения 567 В.

Результаты численного моделирования для условий пикового режима работы представлены на рис. 13, для номинального режима – на рис. 14. Представленные характеристики дают возможность выполнить комплексную оценку энергетической эффективности исследуемого электродвигателя в различных режимах работы.

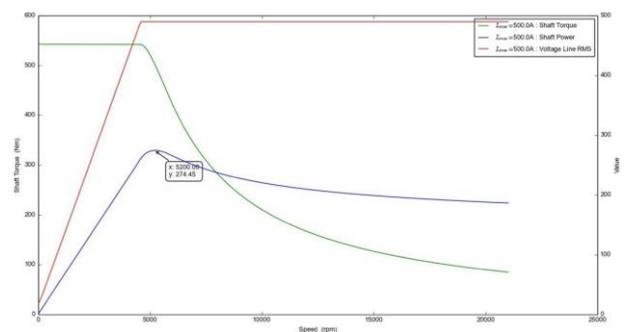


Рис. 13. Электромеханическая характеристика пиковая

По результатам расчета номинальная частота вращения составляет 5000 об/мин, а номинальный момент 340 Н·м.

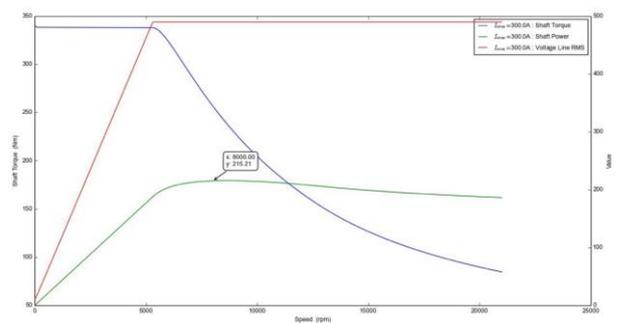


Рис. 14. Электромеханическая характеристика номинальная

Выводы. По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Электродвигатель Xiaomi благодаря применению передовых технологий в конструкции ротора и магнитной системе обеспечивает высокую скорость вращения и стабильную работу при различных нагрузках. Это решение позволяет достичь высокой мощности при компактных геометрических размерах и снизить энергозатраты, что является ключевым в разработке современных электроприводов.

2. В процессе модернизации тяговых электродвигателей все чаще применяются Hairpin-обмотки, которые обладают более лучшим теплоотводом и работают с высокой плотностью тока.

3. В рамках исследования синтезированы функциональные зависимости электромагнитного момента и выходной мощности от угловой скорости вращения при ограниченном значении питающего напряжения 567 В.

Список литературы

1. Wu H. Topology optimization of electric motors based on finite element computation: dr. tech. sci. diss.: 05.09.01 / The Hong Kong Polytechnic University. – Hong Kong, 2023. – 175 p.

2. **Rahmanov I., Koniushenko E.V., Fomin E.I.** Investigation of the Influence of the Geometric Dimensions of Permanent Magnets on the Magnitude of the Back Electromotive Force in Synchronous Machines with Sensorless Control // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk, 2023. – P. 573–577. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291109.

3. **Стасенко И.С., Герасименко Н.В., Савицкий В.С.** Методика проектирования тягового электродвигателя для транспорта // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1(58). – С. 24–30. DOI: 10.46864/1995-0470-2022-1-58-24-30.

4. **Taghavi S.** Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications: dr. tech. sci. diss. / Concordia University. – Montreal, 2015. – 173 p.

5. **Performance** Comparison of Permanent Magnet and Electrically Excited Motors for Electric Vehicles / D.Q. Vuong, B.M. Dinh, N.T.M. Hien, D.T. Bao // Journal Européen des Systèmes Automatisés. – 2023. – Vol. 56, No. 3. – P. 501–506. DOI: 10.18280/jesa.560318.

6. **Kimiabeigi M.** On the Design of a Low-Cost High-Performance Traction Motor with Ferrite Magnets: dr. tech. sci. diss. / Newcastle University. – Newcastle upon Tyne, 2017. – 133 p.

7. **Puranen J.** Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study: dr. tech. sci. diss. / Lappeenranta University of Technology. – Lappeenranta, 2006. – 147 p.

8. **Torque** Analysis in Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comparative Study / J.A. Güemes, A.M. Iraolagoitia, J.I. Del Hoyo, P. Fernández // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2011. – Vol. 26, No. 1. – P. 55–63.

References

1. Wu, H. Topology Optimization of Electric Motors Based on Finite Element Computation: dr. tech.

sci. diss.: 05.09.01. The Hong Kong Polytechnic University. Hong Kong, 2023. 175 p.

2. Rahmanov, I., Koniushenko, E.V., Fomin, E.I. Investigation of the Influence of the Geometric Dimensions of Permanent Magnets on the Magnitude of the Back Electromotive Force in Synchronous Machines with Sensorless Control. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Magnitogorsk, 2023, pp. 573–577. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291109.

3. Stasenka, I.S., Gerasimenko, N.V., Savitskiy, V.S. Metodika proektirovaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya transporta [Design methodology of traction electric motor for transport]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2022, no. 1(58), pp. 24–30. DOI: 10.46864/1995-0470-2022-1-58-24-30.

4. Taghavi, S. Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications: dr. tech. sci. diss. Concordia University. Montreal, 2015. 173 p.

5. Vuong, D.Q., Dinh, B.M., Hien, N.T.M., Bao, D.T. Performance Comparison of Permanent Magnet and Electrically Excited Motors for Electric Vehicles. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2023, vol. 56, no. 3, pp. 501–506. DOI: 10.18280/jesa.560318.

6. Kimiabeigi, M. On the Design of a Low-Cost High-Performance Traction Motor with Ferrite Magnets: dr. tech. sci. diss. Newcastle University. Newcastle upon Tyne, 2017. 133 p.

7. Puranen, J. Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study: dr. tech. sci. diss. Lappeenranta, 2006. 147 p.

8. Güemes, J.A., Iraolagoitia, A.M., Del Hoyo, J.I., Fernández, P. Torque Analysis in Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comparative Study. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 55–63.