

## 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

УДК 621.313

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2026.2.3>



# СИНТЕЗ ТОПОЛОГИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Ильяс Рахманов<sup>1</sup>, Елизавета Владимировна Конюшенко<sup>2\*</sup>, Дмитрий Андреевич Ромашкин<sup>3</sup>,  
Ольга Ивановна Байдакова<sup>4</sup>, Юрий Михайлович Сафонов<sup>5</sup>, Александр Сергеевич Иванов<sup>6</sup>

<sup>1-6</sup> Национальный исследовательский университет "МЭИ" (д. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Российская Федерация)

<sup>1</sup> RahmanovIlias97@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-3275-9250>

<sup>2</sup> Konyushenko.elizaveta@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6707-4528>

<sup>3</sup> RomashkinDA@mpei.ru; <https://orcid.org/0009-0007-6649-1083>

<sup>4</sup> KiselevaOI@mpei.ru; <https://orcid.org/0009-0001-0222-920X>

<sup>5</sup> SafonovYM@mpei.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0801-1383>

<sup>6</sup> IvanovAIS@mpei.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1011-0353>

\* Автор, ответственный за переписку

**Аннотация. Введение.** Актуальность работы обусловлена возрастающими требованиями к эффективности, надежности и удельной мощности электромеханических преобразователей энергии в современных транспортных системах. **Цель.** Исследовать принципы синтеза топологии высокоскоростных роторных систем, предназначенных для применения в тяговом электротранспорте. **Материалы и методы.** В работе представлены результаты расчетных исследований динамических характеристик, включая зависимости момента, скорости вращения и силы тока от времени, что позволяет оценить переходные процессы и эксплуатационные характеристики различных топологических решений. **Результаты и обсуждение.** Полученные результаты демонстрируют важность комплексного подхода к синтезу топологии роторных систем, учитывающего электромагнитные, механические, тепловые и технологические аспекты проектирования. **Заключение.** Исследование вносит вклад в развитие теории и практики создания высокоэффективных электромеханических преобразователей для современного электротранспорта. Кроме того, в статье рассмотрен способ улучшения характеристик электрической машины с помощью применения инновационного материала-термомата.

**Ключевые слова:** высокоскоростные электрические машины, увеличение удельной мощности, повышение надежности, улучшение охлаждения, электрический транспорт

**Для цитирования:** Синтез топологий высокоскоростного электропривода для тягового электротранспорта / И. Рахманов [и др.] // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2026. № 2(113). С. 29–36. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2026.2.3>

**Финансирование.** 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.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.01.2026;

одобрена после рецензирования 20.02.2026;

принята к публикации 27.02.2026.

Research article

# SYNTHESIS OF HIGH-SPEED TOPOLOGY ELECTRIC DRIVE FOR TRACTION ELECTRIC TRANSPORT

Ilyas Rahmanov<sup>1</sup>, Elizaveta.V. Koniushenko<sup>2\*</sup>, Dmitry A. Romashkin<sup>3</sup>, Olga I. Baidakova<sup>4</sup>,  
Yuri M. Safonov<sup>5</sup>, Alexander S. Ivanov<sup>6</sup>

<sup>1-6</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation)

<sup>1</sup> RahmanovIlias97@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-3275-9250>

<sup>2</sup> Konyushenko.elizaveta@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6707-4528>

<sup>3</sup> RomashkinDA@mpei.ru; <https://orcid.org/0009-0007-6649-1083>

<sup>4</sup> KiselevaOI@mpei.ru; <https://orcid.org/0009-0001-0222-920X>

<sup>5</sup> SafonovYM@mpei.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0801-1383>

<sup>6</sup> IvanovAIS@mpei.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1011-0353>

\* Corresponding author

**Abstract. Introduction.** The relevance of this work is due to the increasing requirements for efficiency, reliability, and specific power of electromechanical energy converters in modern transport systems. **Goal.** This article focuses on the principles of topology synthesis for high-speed rotary systems intended for use in electric traction vehicles. **Materials and methods.** The paper presents the results of computational studies of dynamic characteristics, including the dependence of torque, rotational speed, and current strength on time, which allows for the evaluation of transient processes and performance characteristics of various topological solutions. **Results and discussion.** The obtained results demonstrate the importance of a comprehensive approach to the topology synthesis of rotary systems, taking into account the electromagnetic, mechanical, thermal, and techno-

logical aspects of design. **Conclusion.** The study contributes to the development of the theory and practice of creating highly efficient electromechanical converters for modern electric vehicles. In addition, the article discusses a method for improving the performance of an electric machine by using an innovative thermomat material.

**Keywords:** high-speed electric machines, increase specific power, reliability improvement, cooling improvement, electric transportation

**For citation:** Rahmanov I, Koniushenko EV, Romashkin DA, Baidakova OI, Safonov YM, Ivanov AS. Synthesis of topologies for high-speed electric drive for traction electric transport. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2026;2(113):29-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2026.2.3>

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

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interests.

The article was submitted 16.01.2026;

approved after reviewing 20.02.2026;

accepted for publication 27.02.2026.

**Введение / Introduction.** Современные электромеханические устройства, включая тяговые электроприводы, предъявляют повышенные требования к своим компонентам с точки зрения эффективности, надежности и удельной мощности. Основой таких устройств является ротор – подвижная часть электрической машины, взаимодействующая с неподвижным статором для создания электромагнитного поля.

Ключевым параметром, определяющим характеристики электродвигателя, выступает его топология. Это понятие охватывает не только геометрическую конфигурацию ротора, но и комплекс функциональных, структурных и полевых характеристик, влияющих на его функционирование [1]. Топология как раздел математики, изучающий свойства пространства при непрерывных преобразованиях, находит все более широкое применение в проектировании электрических машин [2]. В контексте электромеханических преобразователей энергии, топология роторных систем представляет собой сложную систему взаимодействий между структурными элементами ротора, определяющими его функциональные, электромагнитные и механические характеристики.

Топология ротора электрической машины представляет собой сложную систему, состоящую из нескольких элементов. К ним относятся: форма и расположение активных зон; материалы, из которых изготовлены детали ротора (магнитные, проводящие, диэлектрические); линии магнитного поля; пути движения вихревых токов и направление тепловых потоков. При этом форма ротора не ограничивается лишь его геометрическими характеристиками. Она также включает в себя функциональные связи между его компонентами. Это делает топологический анализ важным инструментом в проектировании, который позволяет оценивать и сопоставлять различные архитектурные концепции на более глубоком и абстрактном уровне.

В математике топологию роторной системы можно описать с помощью топологических инвариантов – это характеристики, которые остаются неизменными при определённых преобразованиях [3]. Среди таких инвариантов можно выделить: связность структуры, которая показывает, насколько система цела механически; число Бетти и род поверхности, которые используются для анализа внутренних полостей и каналов; распределение массы и моментов инерции; количество и конфигурация магнитных путей; электрические контуры и пути протекания токов; наличие и расположение вентиляционных полостей и технологических отверстий, которые влияют на распределение напряжений и тепловые процессы.

**Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.** В процессе создания высокоскоростных электрических машин особое внимание уделяется взаимосвязи между геометрическими характеристиками и конструкцией ротора. Это связано с тем, что при разработке таких устройств необходимо обеспечить: высокие электромагнитные показатели, такие как удельная мощность, коэффициент полезного действия и стабильность возбуждения; механическую прочность, включая устойчивость к центробежным нагрузкам и вибрациям; стабильность температурного режима. Таким образом, исследование и разработка оптимальной конструкции ротора становятся важными задачами, поскольку требуют комплексного подхода к проектированию, который учитывает разнообразные требования и критерии современных электромеханических преобразователей энергии.

Переход от традиционных, преимущественно эмпирических методов проектирования к автоматизированным численным методам, включая методы топологической оптимизации, открывает новые перспективы для создания эффективных, лёгких и надёжных роторных систем.

**Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.** В ходе исследования изучены конструктивные особенности, устройство и материалы, из которых изготовлены

роторы современных электродвигателей с постоянными магнитами, используемых в транспортных средствах с электрическим двигателем [4–5]. Для анализа выбраны три модели двигателей от различных производителей, которые отличаются по своему устройству, техническим характеристикам и производителям: Geely TZ220XS140, JEE EI09M-CW-M-007 и Huawei YS210XY1P5 (асинхронный).

Электродвигатель Geely TZ220XS140. В конструкции ротора электродвигателя используются мощные постоянные магниты, которые размещаются на внутренней поверхности ротора. Эти магниты имеют форму буквы W и состоят из нескольких частей. Они крепятся к ротору с помощью специального клея, который не только обеспечивает прочное соединение при высоких скоростях и температурах, но и выполняет функцию теплопроводящего слоя. Расположение и форма магнитов на роторе показаны на рисунке 1.

В конструкции ротора есть специальные вентиляционные каналы, которые помогают снизить вес ротора. Также на роторе установлен датчик положения – резольвер J100XU9734A. Он точно определяет угол поворота ротора. Вал ротора сделан из нержавеющей стали. В его центре есть отверстие. На конце вала – шлицы, которые позволяют соединить его с редуктором электродвигателя. Статор электродвигателя имеет 8 полюсов и 48 пазов. Обмотка однослойная, насыпная, распределенная. Количество параллельных ветвей 8, число элементарных проводников в пазу – 80, в одном эффективном – 5. Число витков в одной катушке – 16.

Конструкция паза в электродвигателе имеет свои особенности. Его стенки обработаны специальным чёрным составом, а сам паз изготовлен из материала под названием фторопласт. В более ранних исследованиях проводились испытания электродвигателя, в котором паз был изолирован с помощью фторопласта.

При нагревании фторопласт становится более плотным и твёрдым. Важно подчеркнуть, что в конструкции паза нет компаунда, смол или лака. Это делает конструкцию менее монолитной и усложняет условия отвода тепла из паза. Это может негативно повлиять на теплообмен в обмотке [6]. Проведем моделирование электродвигателя Geely TZ220XS140 и определим его коэффициент полезного действия (КПД). Карта КПД – это эффективный способ анализа работы электродвигателя на всех частотах (рис. 2).



Рис. 1. Ротор электродвигателя Geely TZ220XS140 /

Fig. 1. Geely TZ220XS140 Electric Motor Rotor

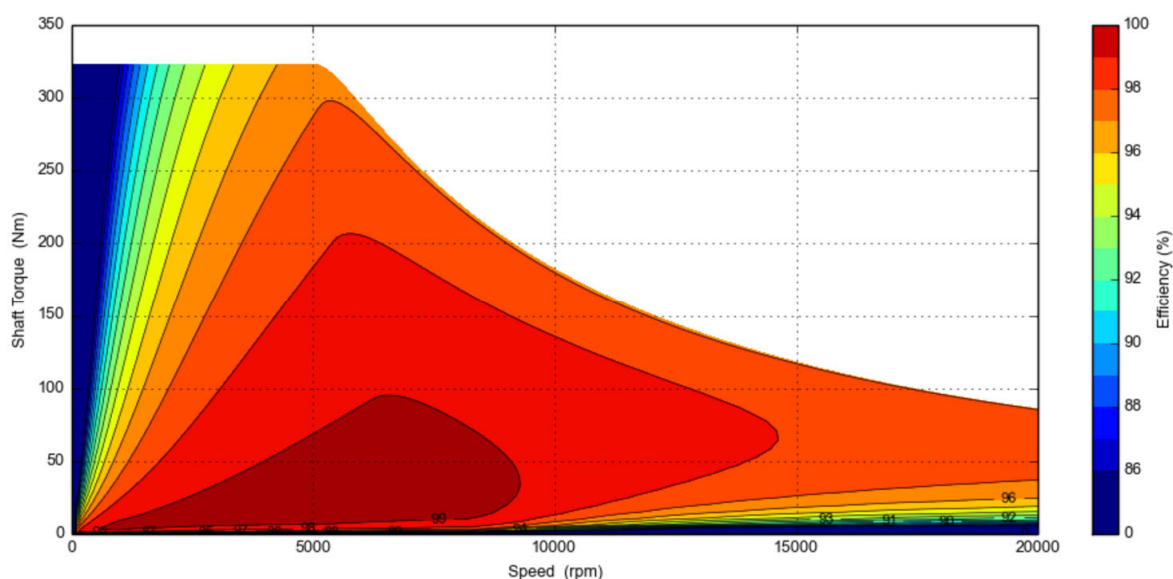


Рис. 2. Карта КПД электродвигателя Geely TZ220XS140 / Fig. 2. Geely TZ220XS140 electric motor efficiency map

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Также на рисунке 3 представлен расчет момента, скорости вращения и силы тока от времени. По графикам, построенным для постоянной мощности, можно определить максимальное значение момента, которое составляет 320 Н·м. Вероятно, при использовании системы изоляции типа МОНОЛИТ можно было бы достичь лучших результатов.

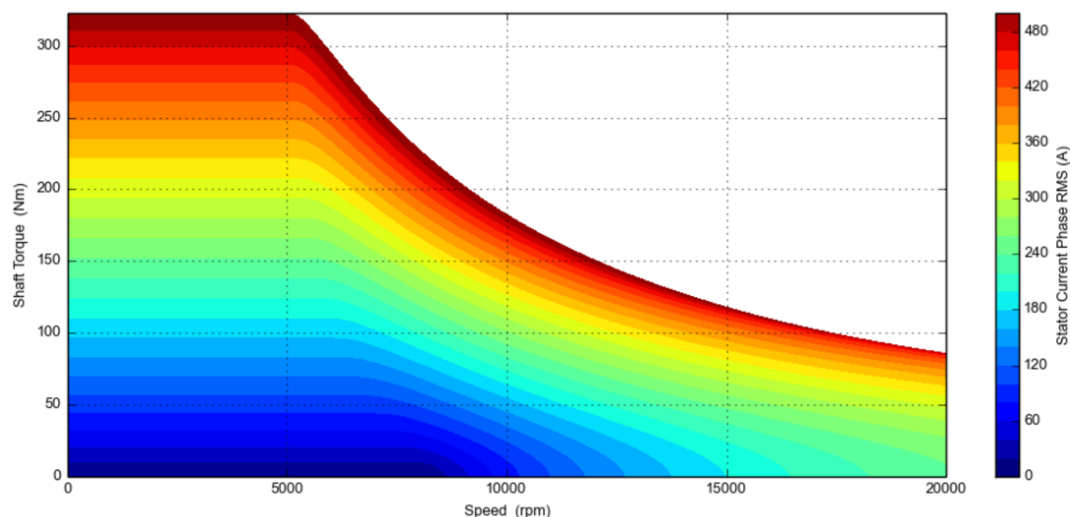


Рис. 3. Зависимость момента, скорости вращения и силы тока от времени для электродвигателя Geely TZ220XS140 / Fig. 3. Dependence of the torque, rotation speed and current strength on time for the Geely TZ220XS140 electric motor

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Электродвигатель JEE EI09M-CW-M-007. Среди тяговых электродвигателей особый интерес представляет модель JEE EI09M-CW-M-007. Данный образец детально изучен путем разборки и анализа. Расчет номинальных параметров электродвигателя не проводился, поскольку эти сведения доступны в технической документации. На рисунке 4 изображён ротор электродвигателя модели JEE EI09M-CW-M-007. Он оснащён мощными постоянными магнитами, которые находятся на внутренней поверхности цилиндрической части ротора. Магнитная система ротора имеет особую конструкцию: нижние магниты имеют V-образную форму, а верхние – плоскую. Такое расположение магнитов позволяет эффективно распределять магнитное поле, сохраняя при этом прочность ротора. В отличие от других моделей, в этой конструкции нет центрального магнита, например в электродвигателе Geely TZ220XS140 магниты расположены в форме буквы W [7].

Статор электродвигателя (рис. 5) имеет восьмиполюсную конструкцию и содержит 48 пазов. Обмотка статора представляет собой однослойную, распределённую всыпную обмотку. Электрическая схема обмотки состоит из восьми параллельных ветвей, каждая из которых содержит по 80 элементарных проводников, объединённых в 5 эффективных проводников. В каждой катушке обмотки содержится 16 витков, что обеспечивает необходимую амплитуду ЭДС.

Электродвигатель Huawei YS210XY1P5. Ещё одним тяговым электрическим двигателем является асинхронный электродвигатель модели Huawei YS210XY1P5, конструктивные особенности которого принципиально отличаются от ранее рассмотренных двигателей с постоянными магнитами. Корпус электродвигателя представляет собой единую конструкцию, которая интегрирована с передней панелью. Последняя также выполняет функцию части корпуса редуктора (рис. 6). Хотя такой корпус имеет большие размеры по сравнению с традиционными моделями, его конструкция позволяет упростить процесс сборки, сократить количество уплотнительных элементов и повысить надёжность всего устройства. Это компенсирует потенциальные недостатки, связанные с увеличением размеров.

Ротор асинхронного электродвигателя, изображённый на рисунке 7, имеет внешнюю поверхность, закрытую обечайкой. Это устройство препятствует доступу к внутренним компонентам ротора, что делает невозможным проведение прямых измерений и определение его геометрических характеристик без повреждения конструкции. Обечайка выполняет функцию защиты, особенно при высоких частотах вращения.



Рис. 4. Ротор электродвигателя  
JEE EI09M-CW-M-007 /

Fig. 4. Electric motor rotor JEE  
EI09M-CW-M-007

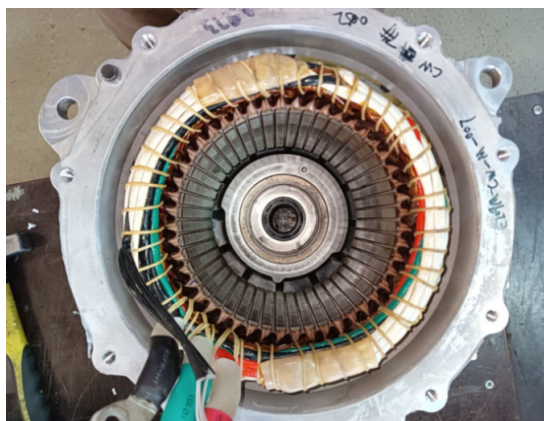


Рис. 5. Статор электродвигателя  
JEE EI09M-CW-M-007 /

Fig. 5. Electric motor stator JEE EI09M-CW-M-007

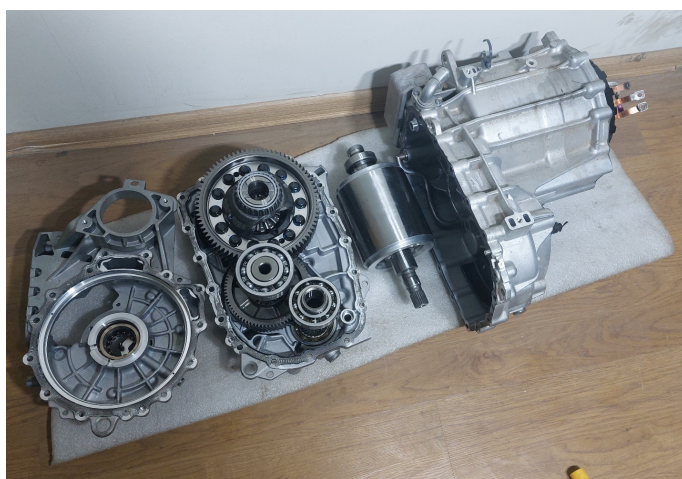


Рис. 6. Разобранный электродвигатель Huawei  
YS210XY1P5 /

Fig. 6. Disassembled electric motor Huawei YS210XY1P5



Рис. 7. Ротор электродвигателя Huawei  
YS210XY1P5 /

Fig. 7. Huawei YS210XY1P5 Electric Motor Rotor

Конец вала выполнен в виде шлицевого соединения. Исследование предыдущих образцов показало, что шлицевое соединение – это оптимальный способ соединения, который обеспечивает высокую надёжность и эффективность передачи крутящего момента между элементами механизма. Обмотка статора выполнена из проводников типа Hairpin и состоит из шести слоёв. На статоре есть 48 пазов, в которые укладываются проводники, создавая необходимую магнитную индукцию и обеспечивая эффективную работу устройства. В связи с повышением требований к удельной мощности, энергоэффективности и надёжности электромеханических преобразователей [8–10], которые используются в тяговых установках электрического транспорта, становится всё более важным проводить сравнительный анализ конструктивных и топологических решений. В рамках этого анализа рассматриваются три актуальных образца электрических машин, включая синхронные двигатели с постоянными магнитами и асинхронные машины. В таблице представлены ключевые параметры и топологические особенности этих образцов: Geely TZ220XS140, JEE EI09M-CW-M-007, Huawei YS210XY1P5.

Таблица / Table

## Сравнительный анализ конструкций роторов / Comparative analysis of rotor designs

| Параметр                       | Geely TZ220XS140                  | JEE EI09M-CW-M-007              | Huawei YS210XY1P5      |
|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Номинальная мощность, кВт      | 70                                | 70                              | 60                     |
| Пиковая мощность, кВт          | 120                               | 150                             | 130                    |
| Номинальный момент, Н·м        | 168                               | 154                             | 140                    |
| Пиковый момент, Н·м            | 320                               | 320                             | 300                    |
| Ном. частота вращения, об/мин  | 4 000                             | 4 320                           | 4 000                  |
| Макс. частота вращения, об/мин | 18 000                            | 15 360                          | -                      |
| Тип ротора                     | W-образные магниты, внутр. монтаж | V + плоская компоновка магнитов | Короткозамкнутый ротор |
| Тип обмотки                    | однослойная, всыпная              | всыпная                         | Hairpin, 6 слоев       |
| Воздушный зазор, мм            | 0,85                              | 1                               | 0,5                    |
| Удельная мощность, кВт/кг      | 3,8                               | -                               | -                      |

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

В двигателе Geely TZ220XS140 магниты расположены в форме буквы W. Благодаря комбинации внутренних магнитов и системы жидкостного охлаждения, двигатель может стабильно работать на частоте до 18 000 оборотов в минуту и выдавать максимальный крутящий момент в 320 Н·м. Это делает его идеальным выбором для тяжёлых условий эксплуатации.

В конструкции ротора JEE EI09M-CW-M-007 магниты расположены в два слоя: один – в форме буквы V, другой – прямо. Хотя это решение потенциально может лучше управлять магнитным потоком, оно уступает более продвинутым моделям по максимальной частоте вращения.

Асинхронные двигатели, такие как Huawei YS210XY1P5, используют короткозамкнутые роторы. Это упрощает их производство и делает их устойчивыми к частым нагрузкам. Однако они уступают синхронным двигателям по удельной мощности и КПД.

Сравнительный анализ демонстрирует существенное преимущество двигателей с постоянными магнитами по удельной мощности и максимальному крутящему моменту. Кроме того, для уплотнения посадки постоянных магнитов в пазы ротора можно применять инновационный термореактивный материала – термомата. Термомат, расширяющийся при температуре свыше 90 °С, используется для фиксации и заполнения зазоров пазах и уплотнения посадки пазовых клиньев в пазах статора.

**Заключение / Conclusion.** В процессе модернизации конструкций тяговых электродвигателей происходит повсеместное внедрение новых технологий. В частности, активно используются обмотки типа «Hairpin», которые отличаются улучшенными характеристиками отвода тепла и высокой плотностью тока. Такие обмотки применяются в различных моделях, в том числе и в продукции компании Huawei. Традиционная всыпная схема, которая использовалась в JEE, менее эффективна, но при этом требует меньших затрат на производство. Во всех представленных образцах реализованы системы охлаждения с использованием жидкости. Это могут быть спиральные каналы (Geely), интегрированные корпуса (Huawei) или специализированные компаунды. Эти решения позволяют достичь высоких плотностей тока при сохранении допустимого теплового режима. Внутренние магниты с W-образной конфигурацией (Geely TZ220XS140) размещаются внутри активного сердечника ротора в три уровня с чередующимися направлениями. W-образная топология способствует увеличению площади взаимодействия магнитного потока со статором, снижению пульсаций момента и обеспечивает хорошую устойчивость к центробежным нагрузкам. Такая структура обеспечивает баланс между электромагнитной эффективностью и механической прочностью.

Комбинированная V-плоская топология (JEE EI09M-CW-M-007): нижний уровень – V-образные магниты, верхний – прямоугольные. Такая гибридная структура сочетает направленность потока и простоту изготовления. Однако отсутствие центрального (осевого) магнитного пути может ограничивать симметрию поля и предел по частоте вращения.

Короткозамкнутый ротор с массивным телом (Huawei): асинхронные машины традиционно используют литые или сварные роторы с медными или алюминиевыми стержнями. Конструкция Huawei предполагает внешнюю металлическую обечайку, которая повышает механическую жёсткость, но при этом закрывает доступ к геометрии внутренних каналов. Также в рамках исследования

дана рекомендация, что для уплотнения посадки в паз постоянных магнитов необходимо использовать теорморективный материал – термомат, что позволит увеличить механическую прочность.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Huihuan Wu. Topology Optimization of Electric Motors Based on Finite Element Computation: thesis. Dr. Tech. Sc.: 05.09.01. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2023. 175 p.
2. Gangl P., Amstutz S., Langer U. Topology Optimization of Electric Motor Using Topological Derivative for Non-linear Magnetostatics // IEEE Transactions on Magnetics. 2015. T. 52. No. 3. P. 1–4.
3. Igarashi H. Topology Optimization and AI-based Design of Power Electronic and Electrical Devices: Principles and Methods. Academic Press, 2024. ISBN 978-0-323-99.
4. Puranen J. Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study: dis. dr. J. Puranen; Lappeenranta University of Technology. 2006. 147 p.
5. Guemes 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. P. 55–63.
6. 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, Russian Federation. Magnitogorsk, 2023. P. 573–577.
7. Reynolds number based optimization on liquid cooling system for permanent magnet synchronous motor of electric vehicle / Z. Zhang [ at. al.] // Case Studies in Thermal Engineering, 2024.
8. Стасенко И.С. Методика проектирования тягового электродвигателя для транспорта // Вестник Белорусско-Российского университета. 2022. № 1(58). С. 24–30.
9. 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. No. 56(3). P. 501-506.
10. Kimiabeigi M. On the Design of a Low-Cost High-Performance Traction Motor with Ferrite Magnets: dis. ... Cand. Sci. Newcastle University. 2017; 133 p.

### REFERENCES

1. Huihuan Wu. Topology Optimization of Electric Motors Based on Finite Element Computation: thesis. Dr. Tech. Sc.: 05.09.01. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong; 2023. 175 p.
2. Gangl P, Amstutz S, Langer U. Topology Optimization of Electric Motor Using Topological Derivative for Nonlinear Magnetostatics. IEEE Transactions on Magnetics. 2015;52(3):1-4.
3. Igarashi H. Topology Optimization and AI-based Design of Power Electronic and Electrical Devices: Principles and Methods. Academic Press; 2024. ISBN: 978-0-323-99.
4. Puranen J. Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study: Dissertation of Doctor of Technical Sciences. Lappeenranta University of Technology; 2006. 147 p.
5. Guemes JA, Iraolagoitia AM, Del Hoyo JI, Fernández P. Torque Analysis in Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comparative Study. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2011;26(1):55-63.
6. Rahmanov I, Koniushenko EV, Fomin EI. 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, Russian Federation. Magnitogorsk; 2023. P. 573-577.
7. Zhang Z, Song Q, Wang X, Zhao S, Shah SWA. Reynolds number based optimization on liquid cooling system for permanent magnet synchronous motor of electric vehicle. Case Studies in Thermal Engineering. 2024.
8. Stasenko IS. Design methodology of traction electric motor for transport // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2022;1(58):24-30. (In Russ.).
9. Vuong DQ, Dinh BM, Hien NTM, Bao DT. Performance Comparison of Permanent Magnet and Electrically Excited Motors for Electric Vehicles. Journal Européen des Systèmes Automatisés. 2023;56(3):501-506.
10. Kimiabeigi M. On the Design of a Low-Cost High-Performance Traction Motor with Ferrite Magnets: Dissertation of Candidate of Technical Sciences. Newcastle University; 2017. 133 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ильяс Рахманов** – аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Researcher ID: OXC-3479-2025.

**Елизавета Владимировна Конюшенко** – кандидат технических наук доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Researcher ID: ABY-1894-2022.

**Дмитрий Андреевич Ромашкин** – студент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Researcher ID: OXC-3039-2025.

**Ольга Ивановна Байдакова** – аспирант кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Researcher ID: OXC-3598-2025.

**Юрий Михайлович Сафонов** – кандидат технических наук профессор кафедры автоматизированного электропривода, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Researcher ID: OXC-6763-2025.

**Александр Сергеевич Иванов** – кандидат технических наук доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Researcher ID: A-7831-2014.

## ВКЛАД АВТОРОВ

### Ильяс Рахманов

Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

### Елизавета Владимировна Конюшенко

Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Проведение экспериментальных исследований.

### Дмитрий Андреевич Ромашкин

Проведение экспериментальных исследований.

### Ольга Ивановна Байдакова

Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

### Юрий Михайлович Сафонов

Проведение экспериментальных исследований.

### Александр Сергеевич Иванов

Проведение экспериментальных исследований.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ilyas Rahmanov** – post-graduate student of the Department of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Researcher ID: OXC-3479-2025.

**Elizaveta V. Koniushenko** – docent of the Department of Electromechanics, Electrical and Electronic devices of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Researcher ID: ABY-1894-2022.

**Dmitry A. Romashkin** – student of the Department of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Researcher ID: OXC-3039-2025.

**Olga I. Baidakova** – post-graduate student of the Department of Physics and Technology of Electrotechnical Materials and Components of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Researcher ID: OXC-3598-2025.

**Yuri M. Safonov** – professor of the Department of Automated Electric Drive of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Researcher ID: OXC-6763-2025.

**Alexander S. Ivanov** – docent of the Department of Electromechanics, Electrical and Electronic devices of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Researcher ID: A-7831-2014.

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

### Ilyas Rahmanov

Conducting a study is the collection, interpretation and analysis of the data obtained.

The approval of the final version is the acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

### Elizaveta V. Koniushenko

Text preparation and editing – drafting a manuscript and forming its final version. Conducting a study is the collection, interpretation and analysis of the data obtained. Conducting experimental research.

### Dmitry A. Romashkin

Conducting experimental research.

### Olga I. Baidakova

Conducting a study is the collection, interpretation and analysis of the data obtained.

### Yuri M. Safonov

Conducting experimental research.

### Alexander S. Ivanov

Conducting experimental research.