

УДК 621.333.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.231733

## Розробка двигуна постійного струму з безобмотковим ротором для застосування в електротранспорті

Д. А. Івлєв, В. Д. Косенков, О. Ф. Винаков, Е. В. Савьолова, В. Я. Ярмолович

*Зазвичай у сучасних електромобілях у якості тягових електродвигунів використовують синхронні двигуни з магнітоелектричним збудженням. Маючи ряд переваг серед інших типів електричних машин, цей двигун має один істотний недолік – високу вартість, обумовлену високою ціною на постійні магніти. Крім цього, неможливість відключити магнітне поле при несправності двигуна може призвести до виникнення аварійної ситуації на дорозі. У зв'язку із цим виникає необхідність у розробці нових конструкцій електричних машин з електромагнітним збудженням.*

*Конструкція тягового двигуна постійного струму з електромагнітним збудженням за рахунок сегментації статора або ротора дозволяє суттєво послабити поле поперечної реакції якоря шляхом зниження магнітної провідності магнітопроводу в поперечному напрямку. Тому в даній конструкції немає необхідності в установці додаткових полюсів і компенсаційної обмотки. У конструкції відсутні постійні магніти, усі обмотки нерухомі, замість колектора використовується електронний комутатор, а безобмотковий малоінерційний ротор не потребує додаткових мір по відводу тепла. Усе це дозволило суттєво зменшити вартість активних матеріалів тягового двигуна й підвищити його надійність.*

*Для перевірки працездатності нової конструкції були створені повнорозмірний макет двигуна та робочий експериментальний зразок. Прийнявши в якості аналога синхронний реактивний двигун з підмагнічуванням для електромобіля BMW i3, були проведені розрахунки двигуна і його моделювання. Результати аналізу показують, що маса нового двигуна більше маси аналога на 35 %, але при цьому вартість активних матеріалів менше, ніж у аналога, на 63 %. Отримані результати дають підстави щодо можливості втілення даної конструкції у реальне промислове виробництво.*

*Ключові слова: двигун постійного струму, поперечна реакція якоря, число пар полюсів, комутатор.*

### 1. Введение

За более чем столетнюю историю электромобили пережили два подъема и один спад. Первые серийные легковые электромобили начали выпускать в 1907 г. и на несколько десятилетий они стали лидерами автопрома. Однако к 1935 г. электромобили были полностью вытеснены с рынка автомобилями с двигателем внутреннего сгорания. Через 50 лет интерес к электромобилям возродился вновь, а в начале 21 века начался новый подъем.

На протяжении всего 20 века основным тяговым двигателем электромобилей являлся двигатель постоянного тока (ДПТ), но по мере развития силовой электроники он стал терять свои позиции. На рис. 1 представлено процентное соотношение использования трех типов электродвигателей в 44 моделях электромобилей, мировые продажи которых начались в период с 2005 по 2012 годы [1].

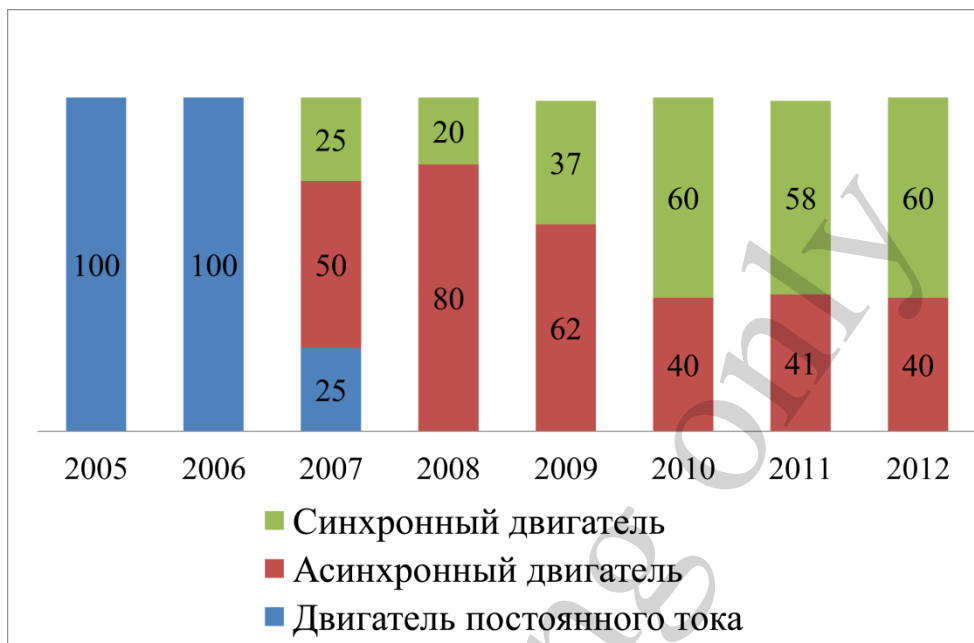


Рис. 1. Динамика применения разных типов электродвигателей

Как видно из диаграммы, к 2008 году двигатели постоянного тока были полностью вытеснены с рынка автомобильных приводов.

Благодаря своим достоинствам – обеспечению постоянного момента в широком диапазоне скоростей, высокой перегрузочной способности, широким возможностям по регулированию возбуждения (параллельное, последовательное, смешанное), – ДПТ наиболее полно соответствует задачам тягового электропривода. Его характеристики до сих пор во многом являются эталонными для любых решений в этой области.

Однако его недостатки, а именно наличие ненадежного коллекторного узла, высокая стоимость и большая масса не позволяют ему занять достойное место среди современных высокотехнологических электрических машин. Поэтому задача создания новых конструкций ДПТ, в которых минимизированы недостатки классических машин постоянного тока, является весьма актуальной.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Анализ, проведенный в [1], показывает, что 60 % всех установленных в электромобилях тяговых двигателей являются синхронными (рис. 1). По типу возбуждения синхронные двигатели можно разбить на три основных группы:

- двигатели с электромагнитным возбуждением;
- двигатели с поверхностно размещенными постоянными магнитами;
- двигатели с инкорпорированными постоянными магнитами.

По данным [2] наиболее востребованными на рынке тяговых приводов электромобилей являются синхронные двигатели с инкорпорированными постоянными магнитами. Подтверждает данный вывод и обзор тяговых двигателей крупнейших мировых производителей электромобилей (Nissan, Tesla, Honda, Toyota, Chevrolet, BMW), приведенный в [3].

Однако в 2020 году на рынке тяговых приводов наметился новый тренд: переход от магнитоэлектрического возбуждения к электромагнитному.

Так, модель BMW i3 2016 года комплектуется гибридным синхронным двигателем с постоянными магнитами [4]. Однако уже на следующую модель iX3 2020 года конструкторы BMW устанавливают тяговый синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением [5]. В этом же направлении развивается и Bentley, которая в августе 2020 заявила об участии в программе OSTOPUS по созданию нового силового агрегата электромобиля без использования постоянных магнитов [6]. Сюда же можно добавить и Renault, который изначально оснащает все свои электромобили марок Berlingo и Zoe только синхронными двигателями с электромагнитным возбуждением.

Основная причина подобных действий – постоянно растущая стоимость, высококоэрцитивных неодимовых магнитов. По оценкам экспертов, в настоящее время она составляет 30÷60 % от всей стоимости активных материалов электродвигателя [7, 8]. По прогнозам [9], из-за растущего спроса, в 2030 г. возможен дефицит постоянных магнитов и значительное увеличение их стоимости. Проблеме отказа от использования дорогих редкоземельных металлов неодима и диспрозия в постоянных магнитах уделяют большое внимание государственные структуры крупнейших промышленно развитых стран. Агентство передовых исследований министерства энергетики США в 2011 году запустило программу REACT (Rare Earth Alternatives in Critical Technologies – Альтернатива редкоземельным элементам в критических технологиях) [10]. В программе приняли участие 14 университетов и национальных лабораторий США, а также 27 университетов и корпораций в качестве партнеров программы. Работы по созданию постоянных магнитов без редкоземельных элементов ведутся не только в США, но и в Евросоюзе, где существует программа «EURARE» (Европейский редкоземельный проект) [11]. В этом же направлении ведутся работы и в Японии, где в 2014 году стартовала государственная программа «Development of Magnetic Materials for High-Efficiency Motors» (Разработка магнитных материалов для высокоэффективных двигателей) [12].

Одним из путей решения проблемы возрастающей стоимости постоянных магнитов является отказ от их использования и возвращение к электромагнитному возбуждению в тяговых двигателях электромобилей. Но для этого необходимо, чтобы двигатели с электромагнитным возбуждением обеспечивали эффективность, сопоставимую с эффективностью двигателей с магнитоэлектрическим возбуждением.

Как известно, тяговая характеристика автомобильного привода имеет две характерные области: постоянного момента в диапазоне  $n=0 \div n_{\text{ном}}$  и постоянной мощности в диапазоне  $n=n_{\text{ном}} \div n_{\text{мах}}$

Обычно у современных тяговых двигателей  $n_{\text{ном}}=5000$  об/мин,  $n_{\text{max}}=12000$  об/мин. Высокая номинальная скорость тягового двигателя необходима для уменьшения его габаритов и увеличения коэффициента полезного действия (КПД). Однако поддерживать высокий КПД во всем диапазоне скоростей невозможно, поэтому конструкторы, анализируя режимы работы двигателя в различных ездовых циклах – городском, пригородном, шоссейном, – выбирают компромиссный вариант. На начальном этапе проектирования при фиксированном значении внешнего диаметра двигатель оптимизируется путем выбора числа пар полюсов. У современных тяговых двигателей этот параметр находится в пределах  $p=4\div 6$  [13].

В [14] приведены данные по влиянию числа пар полюсов на КПД тягового двигателя (рис. 2).

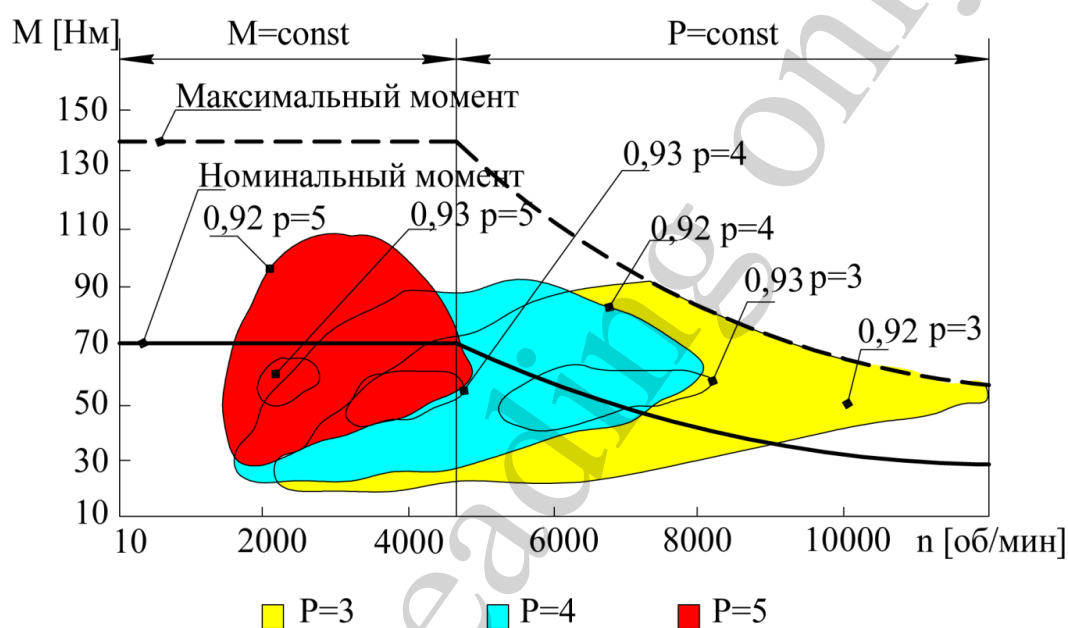


Рис. 2. Тяговые характеристики

Анализ полей КПД, построенных по данным [14], показывает, что современные тяговые двигатели оптимизированы для работы с максимумом КПД либо в зоне постоянного момента  $p=5\div 6$ , либо в средней зоне  $p=4$ . По данным [13], диаметр ротора у двигателей моделей Toyota Prius (Япония), Nissan Leaf (Япония) и BMW i3 (Германия) находится в пределах  $D_p=130\div 180$  мм.

Из-за больших размеров обмоток возбуждения расположить в таком маленьком объеме 12 явно выраженных полюсов невозможно, максимум 4 или 6 (рис. 3, 4) [15, 16]. Однако, если вместо медной обмотки использовать постоянные магниты высотой 5 мм, это не вызовет никаких сложностей (рис. 5) [17].

Исходя из этих рассуждений, можно сделать вывод, что автомобильные двигатели с электромагнитным возбуждением хорошо оптимизированы для работы на высоких оборотах, но уступают по эффективности двигателям с магнитоэлектрическим возбуждением на низких оборотах.

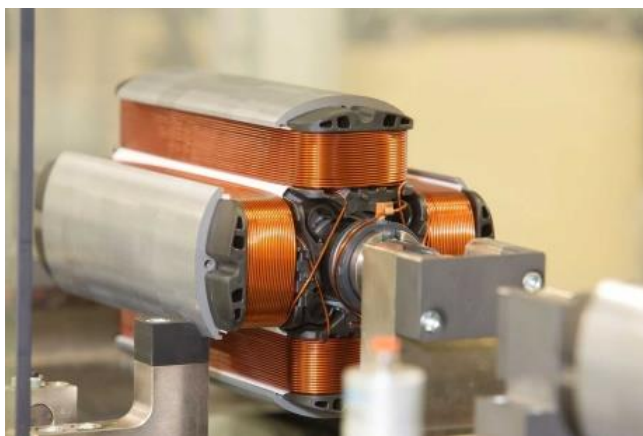


Рис. 3. Ротор Renault Zoe,  $p=2$



Рис. 4. Ротор BMW iX3,  $p=3$



Рис. 5. Ротор BMW i3,  $D_p=180$  мм,  $p=6$

Для двигателей с электромагнитным возбуждением этот недостаток вполне устраним. Проблема малого полюсного деления известна давно и была решена в середине 19 века с появлением конструкции синхронной индукторной машины (ИМ).

Как известно, ротор одноименнополюсной ИМ выполнен в виде зубчатого колеса, в котором зубцы играют роль безобмоточных полюсов. Простейшая одноименнополюсная ИМ имеет только одну обмотку возбуждения, расположенную вместе с обмоткой якоря в неподвижном статоре. В этом случае двигатель

с электромагнитным возбуждением может иметь такое же число полюсов, как и у двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением.

Кроме этого, двигатель с электромагнитным возбуждением лишен главного недостатка, присущего всем двигателям с магнитоэлектрическим возбуждением – невозможности регулирования магнитного потока и невозможности его выключения при аварийных режимах работы двигателя.

В современных тяговых двигателях с магнитоэлектрическим возбуждением этот недостаток практически устранен. Однако решение этой проблемы достигнуто путем усложнения конструкции двигателя и инвертора, что, в свою очередь, ведет к повышению стоимости всего электропривода.

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью исследования является разработка тягового двигателя постоянного тока с магнитной системой индукторного типа для привода электромобиля, что позволит повысить эффективность и экономическую привлекательность данного типа электрических машин.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- создать рабочий макет двигателя постоянного тока с безобмоточным ротором (ДПТБР) и провести его испытания;
- спроектировать тяговый ДПТБР для привода электромобиля, произвести моделирование распределения магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре, анализ стационарного теплового поля, массогабаритный и стоимостной анализ.

### **4. Материалы и методы исследований**

Работы по разработке и исследованию двигателей постоянного тока с безобмоточным ротором с магнитной системой индукторного типа [18] ведутся в Одесском национальном политехническом университете (Украина) с 2006 г.

В ДПТБР, как и в индукторной машине, значение магнитной индукции в рабочем зазоре изменяется только по величине, оставаясь неизменным по знаку. Преобразование энергии в ДПТБР происходит за счет изменения взаимной индуктивности между неподвижными обмотками якоря и возбуждения при перемещении полюсов ротора относительно зубцов статора (рис. 6).

Как и в индукторной машине, в ДПТБР в преобразовании энергии участвует только половина активной поверхности статора (рис. 7), что приводит к необходимости увеличения активной длины секции.

Однако расход меди увеличивается незначительно, так как в ДПТБР можно увеличить число пар полюсов с  $p=3$  до  $p=6$ , в результате чего длина лобовых частей (и, соответственно, общая масса обмотки) уменьшается.

Для проверки работоспособности конструкции был создан полноразмерный работающий макет ДПТБР торцевого исполнения (рис. 8, 9). Его номинальные данные  $P_n=5$  кВт,  $U_n=220$  В,  $n_n=1500$  об/мин ( $\omega_n=157$  с<sup>-1</sup>),  $I_n=25,78$  А,  $M_n=72$  Нм,  $p=3$ ,  $Z\tau=6$ ,  $J=0,0405$  кг·м<sup>2</sup>,  $m=80$  кг, магнитная система изготовлена из конструкционной стали марки Ст3 вместо электротехнической.

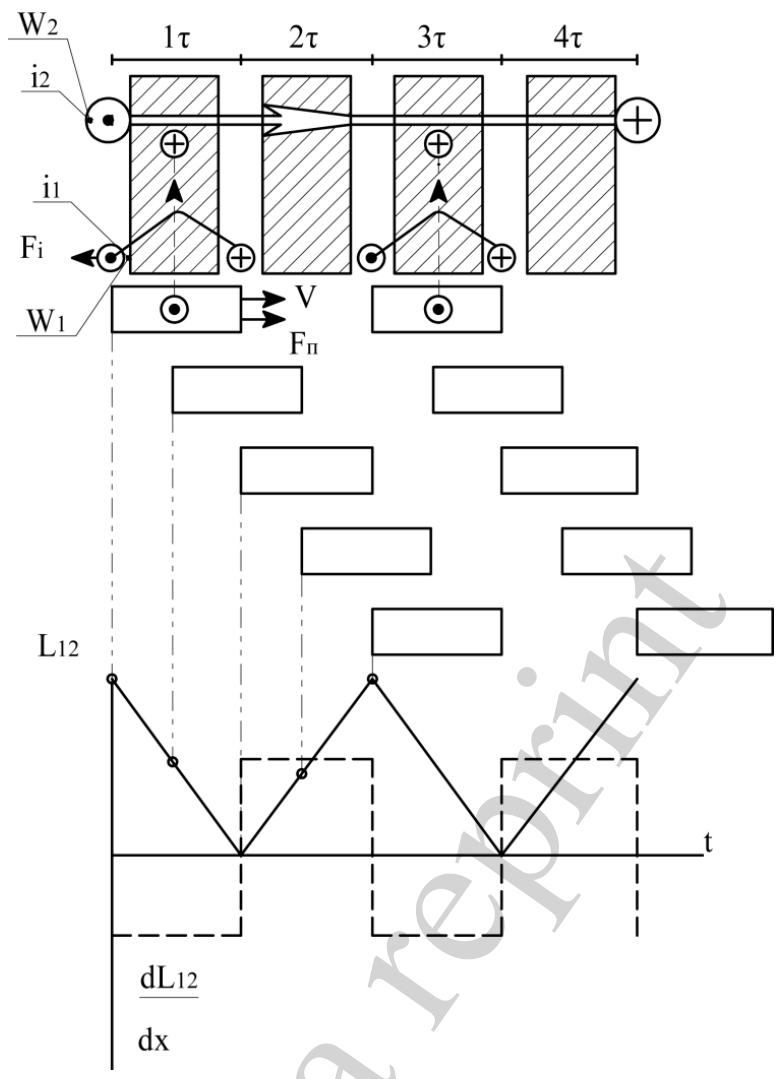


Рис. 6. Изменение потокосцепления

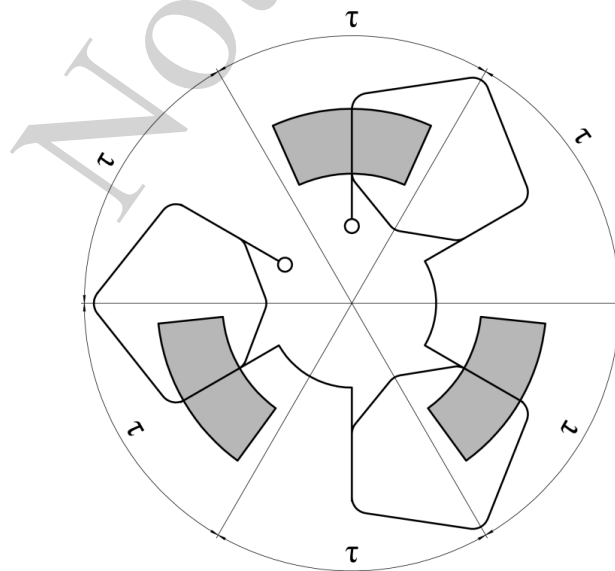


Рис. 7. Секции рабочего макета

Рабочий макет ДПТБР (рис. 9–11) представляет собой двухстаторную торцевую электрическую машину аксиального типа, отличительной особенностью которой является отсутствие общего ярма.



Рис. 8. Внешний вид рабочего макета



Рис. 9. Внутренний вид рабочего макета

Магнитная система ДПТБР состоит из ряда магнитно не связанных стальных сегментов П-образного вида 1, закрепленных в немагнитных (алюминиевых) торцевых щитах 5, между которыми находятся безобмоточные полюса ротора 2. В пазах между сегментами каждого статора уложены секции обмотки якоря 3. Все сегменты каждого статора охвачены общей обмоткой возбуждения 4.

В такой конструкции все пазы статора являются открытыми с обеих сторон (рис. 8, 10), что позволяет существенно ослабить поле поперечной реакции якоря  $\Phi_{ря}$  путем снижения магнитной проводимости магнитопровода в попе-



речном направлении. Поэтому в данной конструкции нет необходимости в установке дополнительных полюсов и компенсационной обмотки.

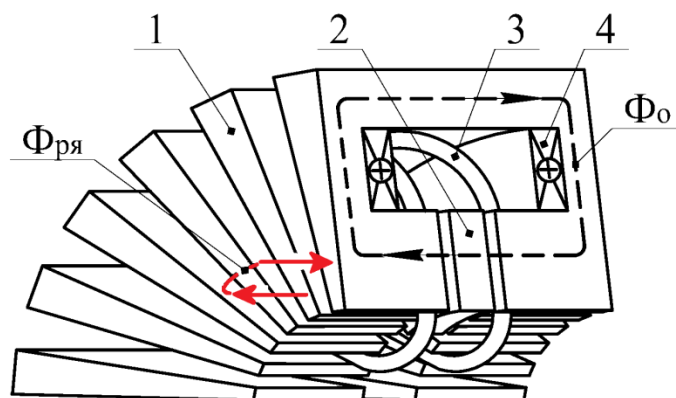


Рис. 10. Аксонометрия рабочего макета

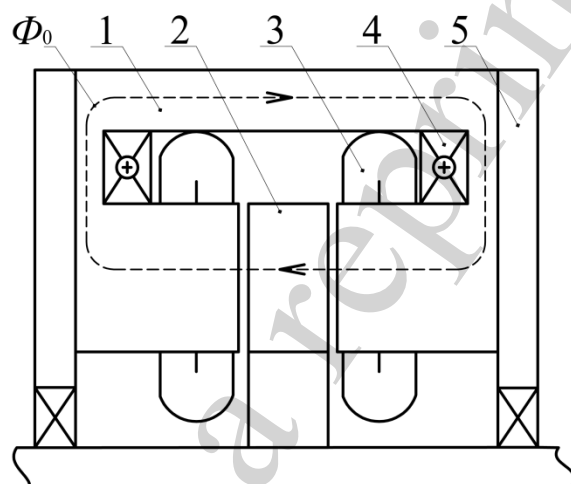


Рис. 11. Разрез рабочего макета

Конструктивная схема с сегментированным статором и цельным ротором (рис. 10) применяется в ДПТБР с максимальной скоростью вращения 1000–1500 об/мин. Для ограничения реакции якоря в высокоскоростных машинах более предпочтительной является конструктивная схема с цельным статором и сегментированным ротором (рис. 12). Общим для двух конструктивных схем являются способы ограничения реакции якоря, показанные ниже на примере конструкции с общим статором.

Первый способ предполагает наличие статора с широкими открытыми пазами. В этом случае магнитное сопротивление воздушного зазора возрастает из-за отсутствия замыкания по коронкам зубцов и его величина может быть выбрана минимально технологически возможной (рис. 12, левая сторона).

Сегментированный полюс, площадь которого равна площади не сегментированного полюса, дополнительно ослабляет поле реакции якоря (рис. 12, правая сторона).

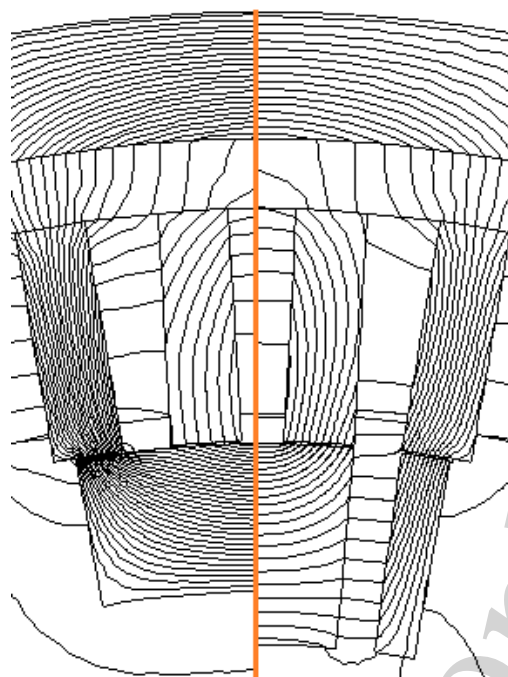


Рис. 12. Статор с широкими пазами и малым рабочим воздушным зазором

Попытка использовать такой подход в статоре с узкими полузакрытыми пазами и малым воздушным зазором, где замыкание поля якоря идет по коронкам зубцов, гарантированно приводит к опрокидыванию поля (рис. 13, левая сторона).

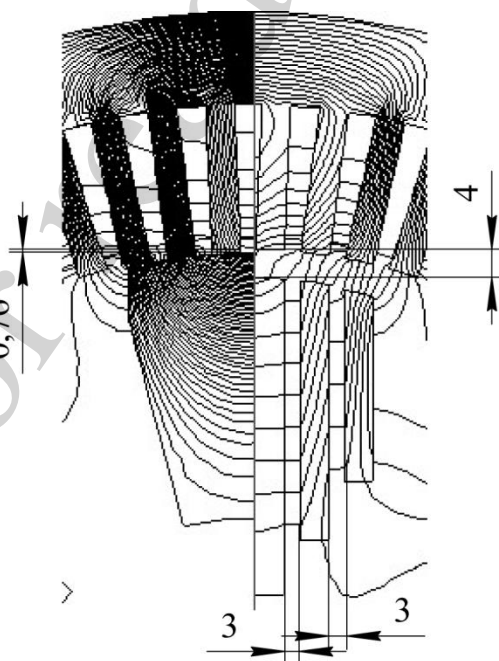


Рис.13. Статор с узкими пазами и большим рабочим воздушным зазором

Поэтому при малой ширине паза необходимо увеличивать величину рабочего воздушного зазора (рис. 13, правая сторона). Такой подход является обще-

принятым для машин постоянного тока, так у серийно выпускаемого ДПТ мощностью  $P=200$  кВт величина воздушного зазора равна  $\delta=3$  мм.

## 5. Результаты исследований двигателя постоянного тока с безобмоточным ротором

### 5.1. Рабочий макет двигателя постоянного тока с безобмоточным ротором торцевого исполнения

Так как магнитная система макета изготовлена из конструкционной стали марки Ст3, испытания ДПТБР проводились в ограниченном объеме. Испытания включали в себя: проверку работоспособности конструкции и способа ограничения реакции якоря, снятие осциллограммы пуска и реверса, снятие тяговой характеристики, тепловые испытания, проверку работы с обращенным коллектором и электронным коммутатором.

По результатам испытаний были сделаны следующие выводы.

Конструкция ДПТБР является полностью работоспособной. Сегментированный статор позволяет существенно ослабить поле поперечной реакции якоря, тем самым увеличивая перегрузочную способность двигателя по току (рис. 14).

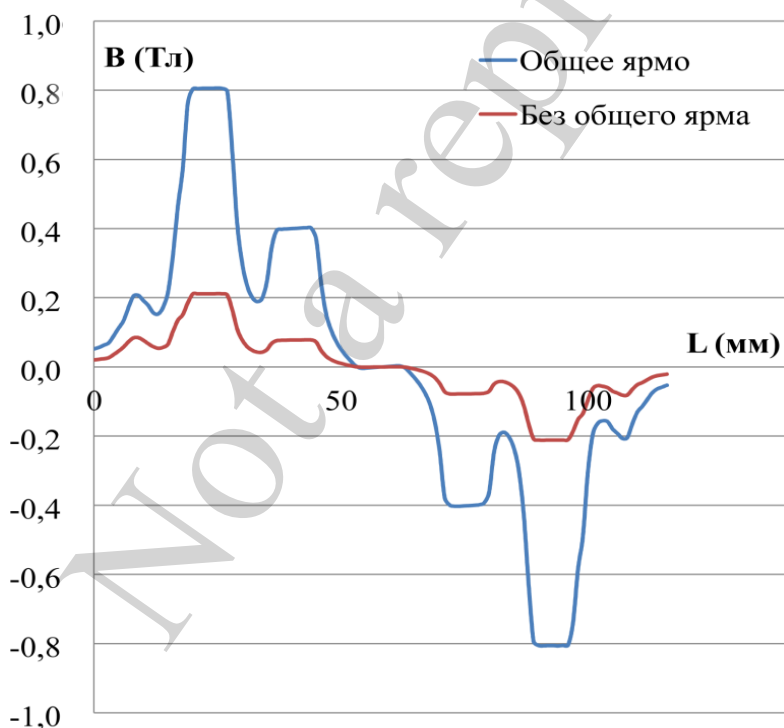


Рис. 14. Распределения магнитной индукции поля якоря в рабочем воздушном зазоре на протяжении  $\tau$

Характер динамических процессов ДПТБР полностью соответствует подобным характеристикам классической машины постоянного тока (рис. 15).

При этом следует отметить полное совпадение значений электромеханической постоянной  $T_M$ , определенной на основании уравнения

$$T_M = j \cdot \frac{\omega_0}{M_n} = 0,0405 \cdot \frac{176}{72} = 0,1c, \quad (1)$$

и значения  $T_M$ , найденного из осциллограммы, где время пуска  $t_{\text{п}}=0,32$  с, а

$$T_M \approx \frac{t_{\text{п}}}{3} = \frac{0,28}{3} = 0,09c. \quad (2)$$

Тяговая характеристика  $M=f(I_{\text{я}})$  (рис. 16) снималась при заторможенном роторе, который фиксировался в заданном положении, затем, по мере изменения тока якоря при номинальном токе возбуждения, производился отсчет по шкале динамометра.

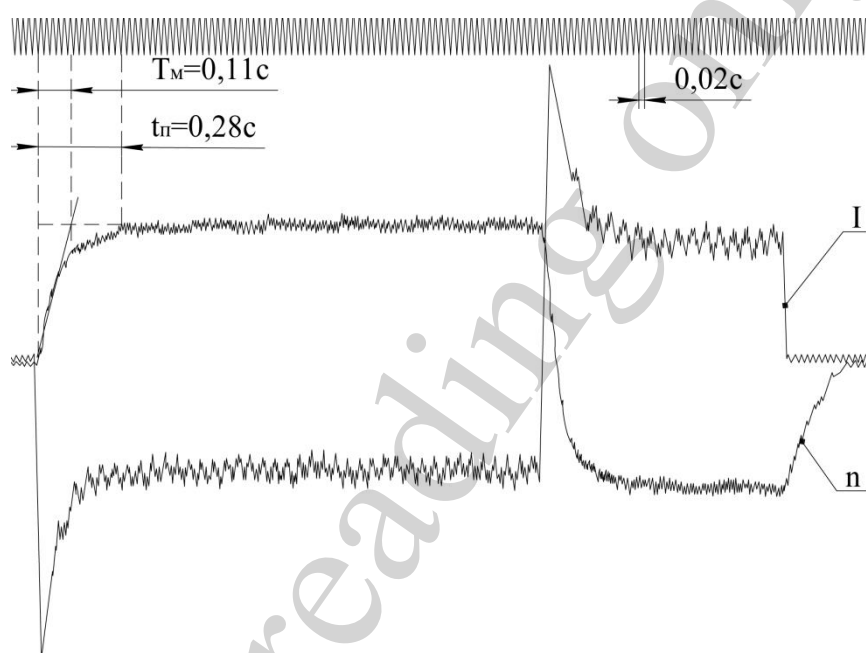


Рис. 15. Осциллограмм пуска и реверса рабочего макета

Из анализа характеристики видно, что экспериментальная кривая проходит ниже расчетной, что связано с быстрым насыщением элементов магнитной цепи двигателя, изготовленных из конструкционной стали – Ст3. Однако даже в этом варианте обеспечивается возможность  $2 \div 2,5$  – кратной перегрузки по току. При значительно меньшей массе вращающихся частей, чем у типового аналога, это обеспечивает повышение быстродействия и экономию энергии в динамичных режимах.

По результатам тепловых испытаний ДПТБР и моделирования его стационарного теплового поля определены превышения температуры обмотки возбуждения  $T_{\text{ов}}=50$  °С и обмотки якоря  $T_{\text{оя}}=62$  °С над температурой окружающей среды  $T_{\text{oc}}=21$  °С. Сравнительный анализ [19] показывает, что ДПТБР с естественным охлаждением отводит тепло более эффективно, чем аналог с самовентиляцией.

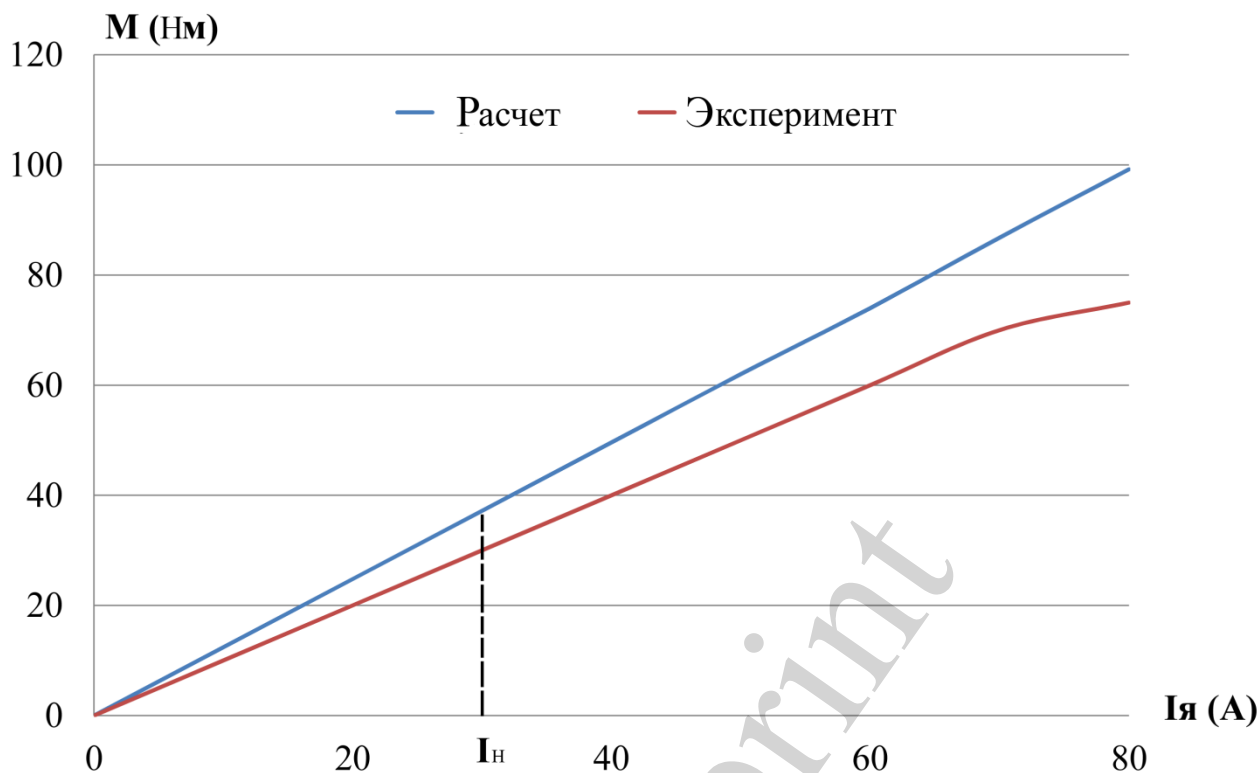


Рис. 16. Моментная (тяговая) характеристика рабочего макета

Первоначально испытания рабочего макета ДПТБР проводились с обращенным коллектором, в котором щеточный узел, закреплённый на валу, вращался относительно неподвижного коллектора, закреплённого на торцевом щите. Очевидное преимущество такого подхода — возможность работы от сети переменного тока с дешевой схемой регулирования на базе тиристорного выпрямителя. В последующем коллектор был заменен электронным коммутатором. На рис. 17 изображена схема двенадцатисекционной обмотки рабочего макета ДПТБР, где в качестве силовых ключей используются IGBT транзисторы.

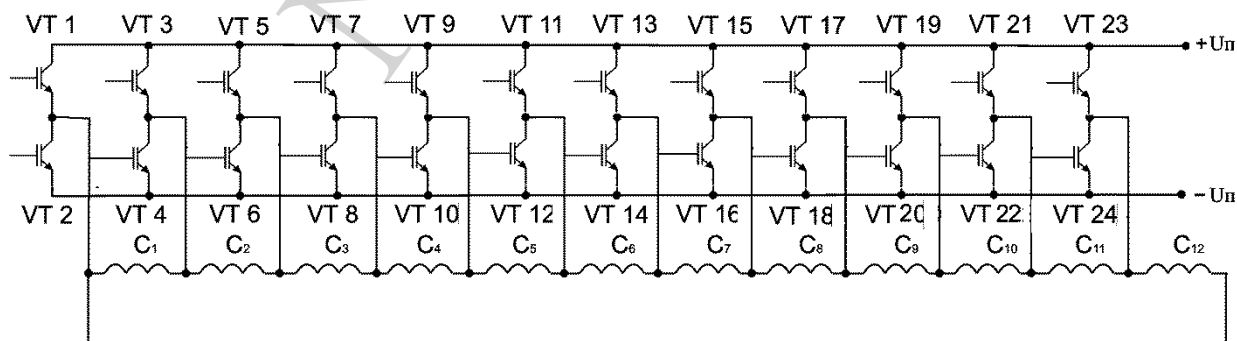


Рис. 17. Схема коммутатора рабочего макета

Работает схема следующим образом. Пусть положение полюсов такое, что датчик положения ротора (ДПР) откроет ключи VT1 и VT14. Тогда ток пройдет

по пути: плюс источника питания, ключ VT1, секции С1–С6 (первая параллельная ветвь), а также параллельно С12–С7 (вторая параллельная ветвь), ключ VT14, минус источник питания. При этом ротор повернется и ДПР закроет ключи VT1, VT14 и включит ключи VT3, VT16 (или VT23, VT12 при перемещении ротора в другую сторону). При включении ключей VT3, VT16 направление тока в секциях С1 и С7 изменится на противоположное. При дальнейшем вращении ротора сигналы ДПР будут включать очередные пары транзисторных ключей и при перемещении на  $2\tau$  двигателя произойдет полный цикл переключения электронных ключей.

После анализа полученных результатов начался следующий этап, а именно проектирование и изготовление полноценного экспериментального образца низкоскоростного генератора постоянного тока с цельным безобмоточным ротором и сегментированным статором. Данный генератор  $P_n=1$  кВт,  $U_n=300$  В,  $n_n=600$  об/мин предназначен для работы в составе ветроэнергетической установки: диаметр внутренней расточки статора  $D_a=140$  мм, число пар полюсов  $p=6$  (рис. 18–20) [20].

Для проектирования генератора была разработана методика расчета низкоскоростных электрических машин данного типа, определены оптимальные значения электромагнитных нагрузок и геометрических соотношений.

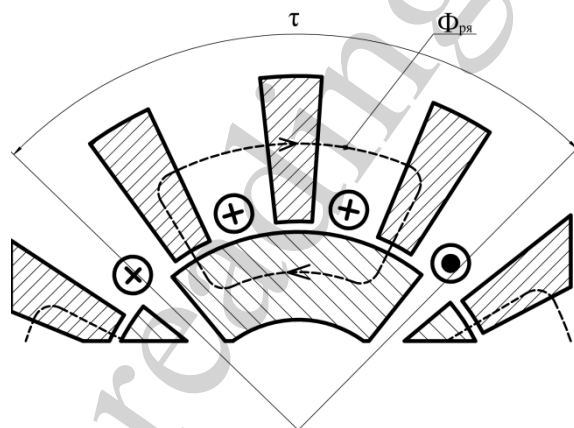


Рис. 18. Сегментированный статор

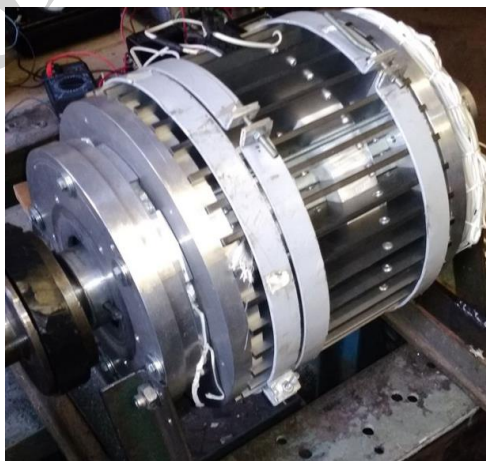


Рис. 19. Внешний вид генератора

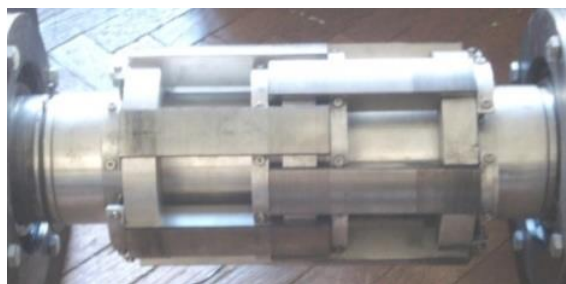


Рис. 20. Ротор  $D_a=140$  мм,  $p=6$

Полный цикл испытаний подтвердил правильность методики расчета и совпадение расчетных и экспериментальных данных.

## **5. 2. Высокоскоростной двигатель постоянного тока с безобмоточным ротором**

Полученный опыт проектирования рабочего макета, учет выявленных недостатков позволил перейти к следующему этапу исследований ДПТБР – разработке высокоскоростного двигателя для работы в составе привода электромобиля.

Как известно, максимальная скорость вращения электрической машины ограничена двумя факторами: механической прочностью ротора и возрастающими потерями в стали. Статор высокоскоростной электрической машины должен выдерживать значительные тангенциальные усилия и иметь относительно небольшую массу для уменьшения потерь в стали.

Конструкция сегментированного статора низкоскоростного ДПТБР (рис. 18) этим требованиям не удовлетворяет. Для высокоскоростных машин более предпочтительной является конструктивная схема с цельным статором и сегментированным ротором (рис. 21, 22). В обоих случаях достигается ослабление поля поперечной реакции якоря. Однако во втором случае расход электротехнической стали меньше.

Корпус 1 ДПТБР является частью магнитной системы и выполнен массивным из обычной конструкционной стали. Массивными являются и полюса ротора 5. Из электротехнической стали выполнен только пакет статора 4, в котором уложена обмотка якоря 3. Пакет статора имеет относительно небольшую массу (из-за малой высоты ярма) и собирается из листов электротехнической стали марки powercore 020-130Y320 толщиной 0,02 мм. Обмотка возбуждения 2 находится внутри корпуса и неподвижна. Такое конструктивное решение является классическим для одноименнополюсных индукторных машин.

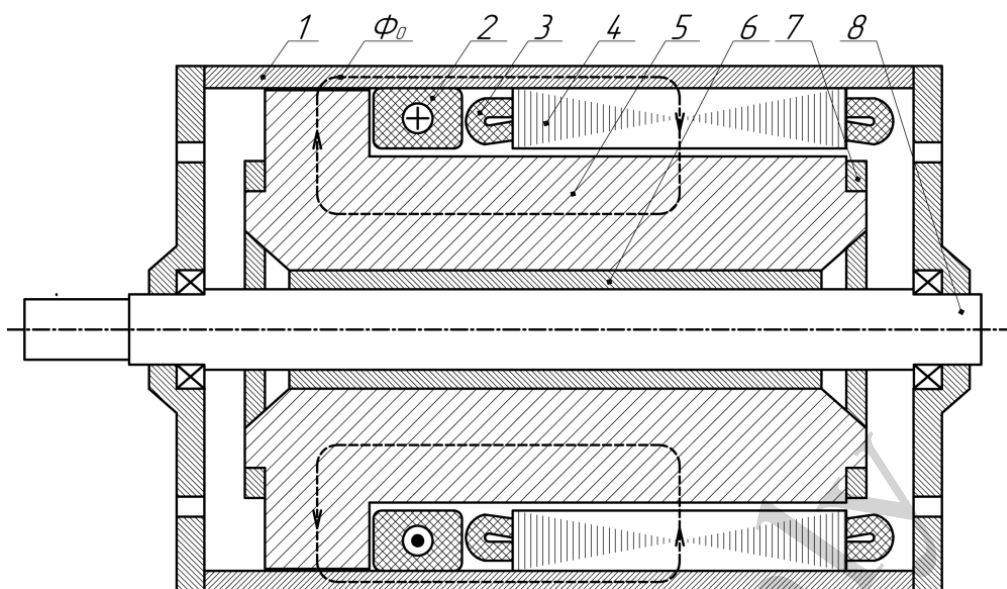


Рис. 21. Высокоскоростной двигатель вид сбоку

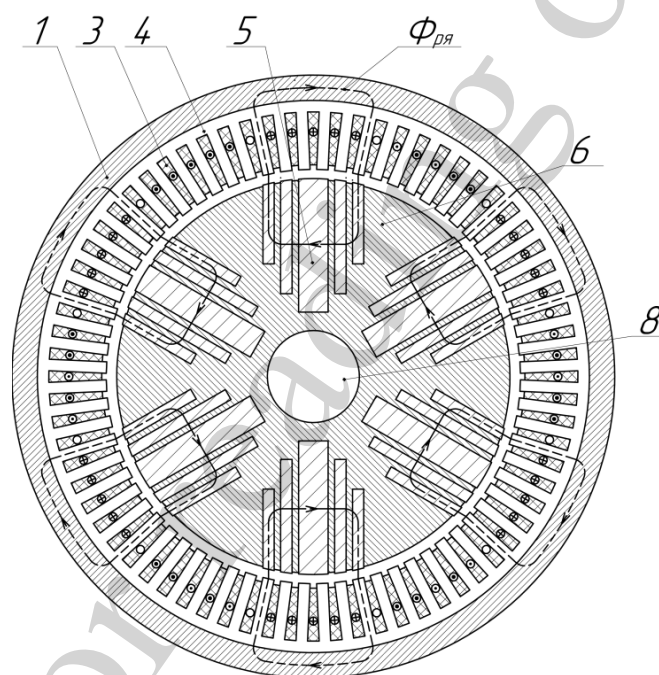


Рис. 22. Высокоскоростной двигатель вид спереди

Сегментированный ротор ДПТБР конструктивно похож на сборный ротор коллекторного типа с призматическими постоянными магнитами (РКТПМ) [21]. РКТПМ используется в высокооборотных электрических машинах летательных аппаратов с частотами вращения  $30 \cdot 10^3 \div 60 \cdot 10^3$  об/мин. Ротор ДПТБР состоит из немагнитного корпуса 6, закрепленного на валу 8, в пазы которого уложены сегменты полюсов 5. Для противодействия центробежным силам ротор ДПТБР, как и РКТПМ, имеет бандажную оболочку из композитного материала, выполненную в виде цельной немагнитной гильзы толщиной 2 мм, и дополнительный композитный торцевой бандаж 7.



В качестве аналога для ДПТБР был выбран синхронный реактивный двигатель с подмагничиванием, установленный в электромобиле марки BMW i3 2016 года. Выбор данного аналога обусловлен тем, что его характеристики хорошо известны [3, 4], в частности благодаря открытым отчетам Tim Burress из Oak Ridge National Laboratory США [17, 22].

На основании данных представленных в этих источниках для расчета ДПТБР были приняты следующие параметры: внутренний диаметр статора  $D_{св}=180$  мм, число пар полюсов  $p=6$ , количество пазов статора  $Z=72$ , охлаждение непрямо́е жидкостное.

Величины линейной токовой нагрузки  $A=11 \cdot 10^4$  А/м и плотности тока  $j=12$  А/мм<sup>2</sup> при непрямом жидкостном охлаждении приняты, исходя из рекомендаций, представленных в [23], где рассмотрены современные методы охлаждения электрических машин.

Как известно, потери в стали резко увеличиваются с ростом частоты. Исходя из рекомендаций по проектированию индукторных машин, были приняты следующие значения индукций – для воздушном зазора  $B_{\delta}=0,4$  Тл, для зубцов  $B_z=0,8$  Тл.

Так как у аналога большое число зубцовых делений на полюс и узкие пазы, то ограничение поперечной реакции якоря проводится по второму способу (рис. 13, правая сторона), предусматривающему наличие большого рабочего воздушного зазора.

В ДПТБР величина  $B_{\delta}=0,4$  Тл, что позволяет с относительно небольшими затратами по массе и потерям увеличить рабочий зазор до  $\delta=4$  мм (рис. 13, правая сторона). Кроме того, большой воздушный зазор позволяет легко разместить роторный бандаж из углепластика.

По принятым исходным данным был проведен расчет высокоскоростного двигателя постоянного тока с безобмоточным ротором. Сравнение ДПТБР и аналога представлено в табл. 1.

Расчетные данные для проведения массогабаритного и стоимостного анализа представлены в табл. 2. Цены на материалы соответствуют 2015 г и взяты из [24], цена конструкционной стали принята как половина цены на электротехническую сталь.

Помимо расчета, было проведено моделирование стационарного теплового поля ДПТБР (рис. 23) и моделирование распределения магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре ДПТБР (рис. 24).

Полученные результаты позволяют произвести предварительную оценку и определить сильные и слабые стороны новой конструкции.

Таблица 1

Сравнительные данные ДПТБР и аналога

Параметр	Ед. изм.	BMW i3	ДПТБР	%
Максимальные значения				
Мощность $P_{\max}$	кВт	125	121,5	–
Момент $M_{\max}$	Нм	250	258	–
Максимальная скорость $n_{\max}$	об/мин	11400	11400	–
Номинальные значения				
Номинальная мощность $P_H$	кВт	75	75,3	–
Номинальный момент $M_H$	Нм	–	159,9	–
Номинальная скорость $n_H$	об/мин	4500	4500	–
Напряжение	В	250–400	250–400	–
Номинальный КПД	%	97	94	–3 %
Линейная токовая нагрузка $A$	А/м	–	$11 \cdot 10^4$	–
Индукция в воздушном зазоре $B_\delta$	Тл	–	0,4	–
Индукция в зубцах $B_z$	Тл	–	0,8	–
Плотность тока в обмотке якоря $j$	А/мм <sup>2</sup>	–	12	–
Наружный диаметр статора $D_{сн}$	мм	242	250	+3 %
Внутренний диаметр статора $D_{св}$	мм	180	180	–
Длина статора	мм	132	167	+21 %
Масса двигателя в сборе	кг	42	64	+35 %

Таблица 2

Масса и стоимость активных материалов

Параметр	Ед. изм.	BMW i3	ДПТБР	%
Масса				
Масса электротехнической стали	кг	21,9	13,2	-40 %
пакет статора $m_{пс}$	кг	13,7	13,2	-4 %
пакет ротора $m_{пр}$	кг	8,2	–	–
Масса конструкционной стали	кг	–	28,6	–
корпус ДПТБР $m_{кр}$	кг	–	8,3	–
полюса ротора ДПТБР $m_{пл}$	кг	–	20,3	–
Масса обмоточной меди	кг	7	13	+46 %
медь обмотки статора $m_{мс}$	кг	7	9	+22 %
медь обмотки возбуждения ДПТБР $m_{ов}$	кг	–	4	–
Масса постоянных магнитов	кг	2	–	–
Стоимость (*)				
Электротехническая сталь	Евро	19,71	11,88	-40 %
Конструкционная сталь	Евро	–	12,87	–
Обмоточная медь	Евро	49	91	+46 %
Постоянные магниты	Евро	240	–	–
ИТОГО	Евро	308,71	115,75	-63 %

Примечание: (\*) Электротехническая сталь=0,90 €/кг; конструкционная сталь=0,45 €/кг; обмоточная медь=7 €/кг; постоянные магниты NdFeB=120 €/кг;

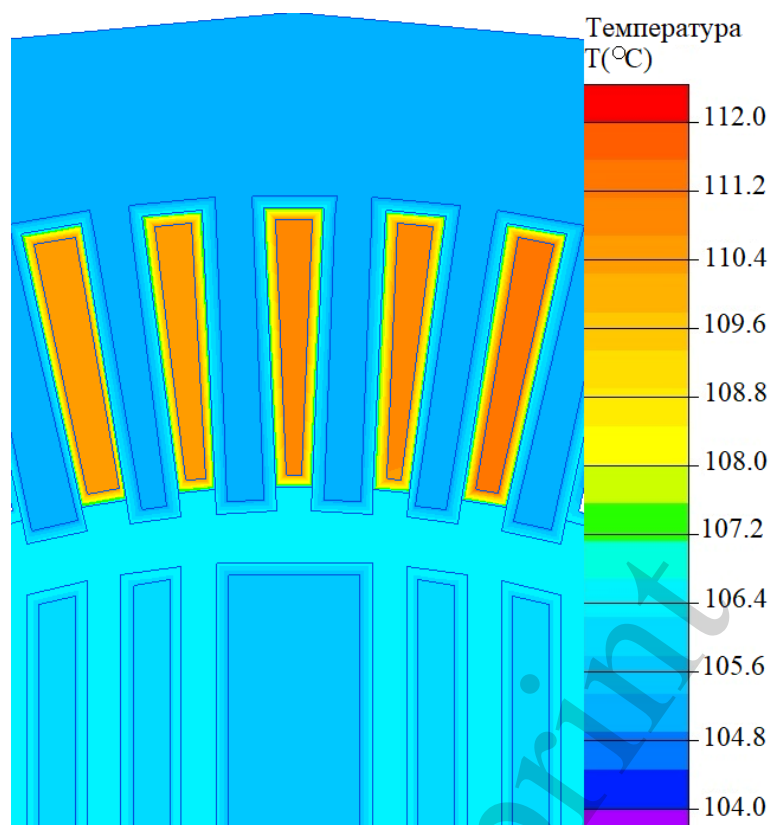


Рис. 23. Распределение температуры высокоскоростного двигателя

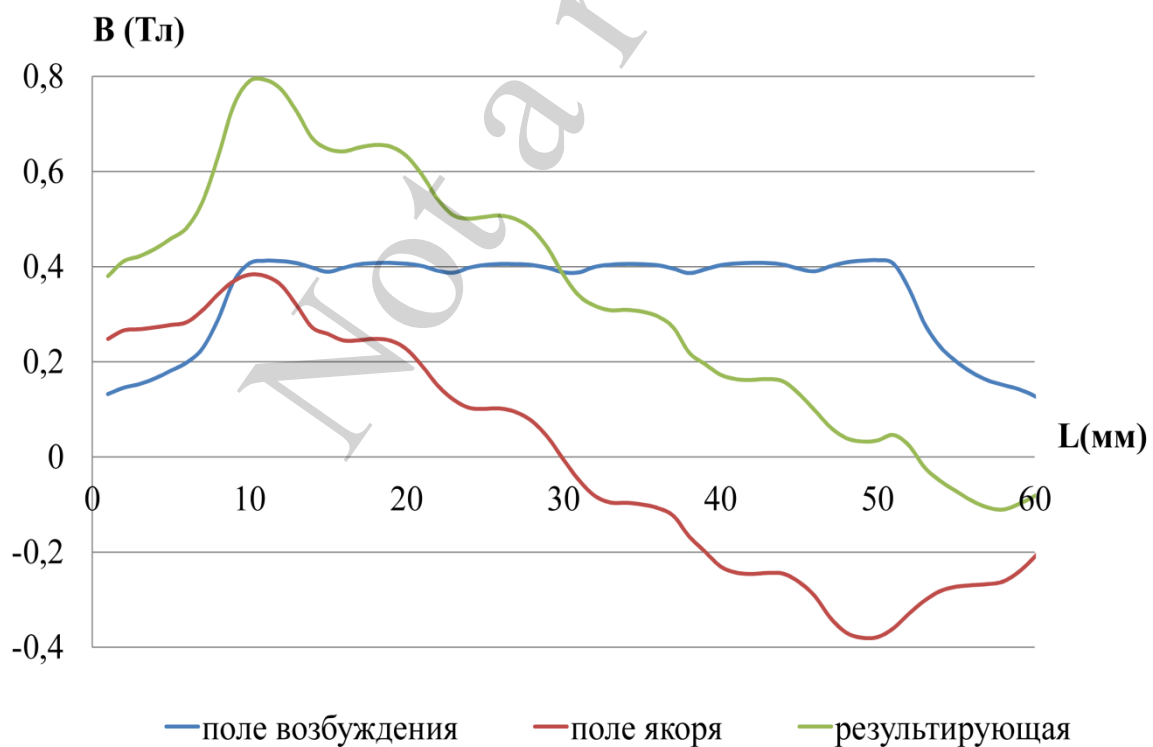


Рис. 24. Распределение магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре высокоскоростного двигателя

## **6. Обсуждение результатов разработки двигателя постоянного тока с безобмоточным ротором для применения в электротранспорте**

В отличие от аналога, у ДПТБР в преобразовании энергии участвует только 50 % полезной площади статора. При условии равенства размеров внутренних диаметров статора ДПТБР и аналога можно было ожидать, что длина пакета статора ДПТБР увеличится на 50 %, однако в реальности прирост составил только 21 % (табл. 1). Подобное отличие связано с тем, что в открытых источниках нет точной информации по величинам электромагнитных нагрузок, значениям индукции и коэффициенту полюсного перекрытия аналога. Увеличение значений этих параметров и привело к уменьшению длины статора.

Анализ стационарного теплового поля ДПТБР показал, что при принятых значениях электромагнитных нагрузок в номинальном режиме работы абсолютные значения температур элементов конструкции не превышают допустимых значений для класса изоляции H (рис. 23).

Сравнительный анализ ДПТБР и аналога (табл. 1) лишний раз подтверждает то, что двигатель с магнитоэлектрическим возбуждением лучше двигателя с электромагнитным возбуждением по массогабаритным и энергетическим показателям. Если по величине коэффициента полезного действия ДПТБР уступает аналогу всего 3%, то по массе он тяжелее аналога на 35% (табл. 1).

В то же время, сравнение стоимости активных материалов ДПТБР и аналога (табл. 2) показывает, что аналог дороже ДПТБР на 63 %. Исходя из анализа стоимости постоянных магнитов, приведенного выше, можно сделать вывод, что в ближайшее время разрыв в цене между двигателями с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением будет только расти.

Моделирование распределения магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре показало, что данная конструкция способна выдерживать 2÷3х кратную перегрузку по току за счет значительного ослабления поля поперечной реакции якоря. На рис. 24 изображено распределение магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре ДПТБР для номинального режима работы. Вид кривых полностью соответствует аналогичным кривым классической машины постоянного тока. Как видно, с увеличением рабочего воздушного зазора уменьшаются пульсации магнитного потока, обусловленные зубчатостью статора.

Конструкция ДПТБР позволяет полностью автоматизировать процесс сборки данного двигателя и максимально сократить время его изготовления, что является важным требованием при изготовлении тяговых двигателей для электромобилей. В перспективе данная конструкция может быть внедрена в промышленное производство.

Следует отметить, что существующая в настоящий момент оптимизированная методика проектирования низкоскоростных ДПТБР не позволяет произвести оптимизацию конструкции высокоскоростного ДПТБР. Оптимизация конструкции высокоскоростного двигателя постоянного тока с безобмоточным ротором является предметом дальнейших исследований.

## 7. Выводы

1. Испытания рабочего макета показали, что ДПТБР, как и любая другая электрическая машина, имеет свои достоинства и недостатки. Однако в сравнении с недостатками классической машины постоянного тока недостатки ДПТБР не столь существенны. Отсутствие коллектора, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки, малоинерционность, 3-х кратная перегрузочная способность, и ротор, от которого не нужно отводить тепло, нивелируют ее недостаток, связанный с необходимостью увеличения длины ротора. В сравнении с синхронными двигателями с электромагнитным возбуждением, ДПТБР эффективнее аналогов в режимах с высоким значением момента за счёт возможности увеличить число пар безобмоточных полюсов.

2. Результаты моделирования, массогабаритный и стоимостной анализ показывают, что по своим энергетическим показателям ДПТБР близок к аналогу. Уступая аналогу 3 % по КПД, ДПТБР в тоже время дешевле аналога на 63 % по стоимости активных материалов.

## Литература

1. De Santiago, J., Bernhoff, H., Ekergård, B., Eriksson, S., Ferhatovic, S., Waters, R., Leijon, M. (2012). Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61 (2), 475–484. doi: <https://doi.org/10.1109/tvt.2011.2177873>
2. Sarlioglu, B., Morris, C. T., Han, D., Li, S. (2015). Benchmarking of electric and hybrid vehicle electric machines, power electronics, and batteries. 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION). doi: <https://doi.org/10.1109/optim.2015.7426993>
3. Staton, D., Goss, J. (2017). Open Source Electric Motor Models for Commercial EV & Hybrid Traction Motors. MDL. URL: <https://docplayer.net/64747945-Open-source-electric-motor-models-for-commercial-ev-hybrid-traction-motors-dr-david-staton-dr-james-goss.html>
4. Merwerth, J. (2014). The hybrid-synchronous machine of the new BMW i3 & i8. URL: [http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404\\_BMW.pdf](http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404_BMW.pdf)
5. Specifications of the BMW iX3, valid from 07/2020 (2020). URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0314265EN/specifications-of-the-bmw-ix3-valid-from-07/2020?language=en>
6. Bentley motors looks to the future of electric drive (2020). Bentley Motors. URL: <https://www.bentleymedia.com/en/newsitem/1128-bentley-motors-looks-to-the-future-of-electric-drive#images>
7. Burress, T. (2015). Non-Rare Earth Motor Development. ORNL. URL: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/edt062\\_burress\\_2015\\_o.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/edt062_burress_2015_o.pdf)
8. Dorrell, D. G., Knight, A. M., Popescu, M., Evans, L., Staton, D. A. (2010). Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles.

2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. doi: <https://doi.org/10.1109/ecce.2010.5618318>

9. Rare Earth Elements: Market Issues and Outlook (2019). Adamas Intelligence. URL: <https://www.adamasintel.com/rare-earth-market-issues-and-outlook/>

10. Rare Earth Alternatives in Critical Technologies (2011). Advanced Research Projects Agency - Energy. URL: <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/react>

11. EuRare Project (2017). NERC. URL: <http://eurare.org/>

12. Development of Magnetic Materials for High-Efficiency Motors (2014). NEDO. URL: [https://www.nedo.go.jp/english/activities/activities\\_ZZJP\\_100078.html](https://www.nedo.go.jp/english/activities/activities_ZZJP_100078.html)

13. Miljavec, D. (2021). D3.2: Report on considered electrical motor technologies, evaluation matrix, concept decision. URL: [http://drivemode-h2020.eu/wp-content/uploads/2021/02/DRIVEMODE\\_D3.2\\_Report-on-electrical-motor-technologies\\_v1.0.pdf](http://drivemode-h2020.eu/wp-content/uploads/2021/02/DRIVEMODE_D3.2_Report-on-electrical-motor-technologies_v1.0.pdf)

14. Finken, T., Hameyer, K. (2009). Design and optimization of an IPMSM with fixed outer dimensions for application in HEVs. 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. doi: <https://doi.org/10.1109/ieemdc.2009.5075438>

15. Le nouveau moteur électrique renforce l'excellence mécanique de Cléon. (2015). Auto-innovations. URL: <https://www.auto-innovations.com/communiquer/417.html>

16. The first-ever BMW iX3 (2020). URL: <https://www.press.bmwgroup.com/latin-america-caribbean/article/detail/T0311128EN/the-first-ever-bmw-ix3?language=en>

17. FY 2016 Annual Progress Report for Electric Drive Technologies Program (2017). Energy. URL: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/08/f36/FY16%20EDT%20Annual%20Report\\_FINAL.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/08/f36/FY16%20EDT%20Annual%20Report_FINAL.pdf)

18. Булгар, В. В., Яковлев, А. В., Ивлєв, Д. А., Ивлєв, А. Д. (2013). Низкоскоростные электрические машины постоянного тока индукторного типа. Одесса: «Бахва», 307.

19. Ивлєв, Д., Косенков, В., Яковлев, А., Желиба, Т. (2015). Анализ стационарного теплового поля в машине постоянного тока индукторного типа. Вісник Хмельницького Національного Університету, 5 (229), 93–97.

20. Івлєв, Д. (2019). Низькошвидкісний генератор постійного струму з безобмотковим ротором для вітроенергетичної установки. Одеса, 21.

21. Исмагилов, Ф., Хайруллин, И., Вавилов, В. (2017). Высокооборотные электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Москва: Инновационное машиностроение, 248.

22. Burress, T. (2017). Electrical Performance, Reliability Analysis, and Characterization. ORNL. URL: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/06/f34/edt087\\_burress\\_2017\\_o.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/06/f34/edt087_burress_2017_o.pdf)

23. Gai, Y., Kimiabeigi, M., Chuan Chong, Y., Widmer, J. D., Deng, X., Popescu, M. et. al. (2019). Cooling of Automotive Traction Motors: Schemes, Examples, and Computation Methods. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66 (3), 1681–1692. doi: <https://doi.org/10.1109/tie.2018.2835397>

24. Ometto, A., Parasiliti, F., Villani, M. (2015). Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Motors for Electric Vehicle applications. 9th International Conference “Energy Efficiency in Motor Driven Systems” EEMODS’15. URL: [https://autodocbox.com/Electric\\_Vehicle/70901524-University-of-l-aquila-permanent-magnet-assisted-synchronous-reluctance-motors-for-electric-vehicle-applications.html](https://autodocbox.com/Electric_Vehicle/70901524-University-of-l-aquila-permanent-magnet-assisted-synchronous-reluctance-motors-for-electric-vehicle-applications.html)

*Not a reprint*