

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.2:621.313:621.331:621.311

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-7>

Исследование асинхронного тягового электродвигателя с наклонными пазами ротора



Александр ЗУЕВ



Михаил ГЛУЩЕНКО

*Александр Сергеевич Зув¹,
Михаил Дмитриевич Глущенко²*

*Российский университет транспорта,
Москва, Россия.*

¹ ORCID 0000-0001-8873-9800;

РИНЦ Author ID: 836869.

✉ ¹ aleksandr-zuev-1987@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Модернизация подвижного состава железных дорог, являющаяся актуальной в целях повышения эффективности железнодорожного транспорта, может проводиться в том числе путём улучшения характеристик тягового привода, а именно конструкции тяговых электродвигателей, что и явилось целью настоящей работы.

Предложена конструкция и представлены результаты исследования характеристик асинхронного тягового электродвигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора для пассажирского электровоза, принципиальной особенностью которого является наклонная форма пазов ротора.

Результаты экспериментального и компьютерного моделирования подтвердили положительный эффект применения в конструкции асинхронного тягового двигателя ротора с наклонными пазами, заключающийся в уменьшении тока в обмотках и снижении потерь двигателя.

Полученные результаты повышения технических характеристик асинхронного тягового двигателя за счет применения в его конструкции ротора с наклонными пазами позволяют рекомендовать такие двигатели для использования на локомотивах.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, асинхронный электродвигатель, тяговый электродвигатель, эксперимент, физическое моделирование, энергосбережение, потери электроэнергии, потери мощности, оптимизация.

Для цитирования: Зув А. С., Глущенко М. Д. Исследование асинхронного тягового электродвигателя с наклонными пазами ротора // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 60–64. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-7>.

*Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.*

ВВЕДЕНИЕ

В условиях конкуренции с современными видами транспорта, такими как автомобильный и авиационный, изобретённый два века назад железнодорожный транспорт требует внедрения новых технических решений для повышения своей эффективности, снижения капитальных затрат и эксплуатационных расходов, включающих затраты на энергопотребление. Задача повышения доходов и инвестиционной привлекательности бизнеса в сфере перевозок сегодня очень актуальна.

Модернизация подвижного состава может проводиться в том числе путём улучшения характеристик тягового привода, а именно конструкции тяговых электродвигателей.

Цель работы заключалась в повышении технических характеристик тяговых асинхронных электродвигателей.

Задачами исследований являлись выбор технического решения, создание макета, экспериментальное исследование эффекта от проведенной модернизации, разработка модели тягового электродвигателя локомотива, расчет технического эффекта с помощью компьютерного моделирования.

Методами работы являлись анализ патентов и научных публикаций в области конструкций тяговых электродвигателей, экспериментальное исследование действующего макета электродвигателя (на основе разработанной экспериментальной установки для его испытаний), компьютерное моделирование электромагнитных процессов в тяговом электродвигателе и расчет потерь.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Постановка задачи. Выбор и обоснование предлагаемой конструкции асинхронного двигателя

Анализ научных публикаций (например, [1–3]) и патентов [4] выявил наличие интереса учёных разных стран мира к разработке электрических машин с наклонными пазами ротора. В связи с тем, что в настоящее время вопрос внедрения таких электрических машин на локомотивах является открытым, целесообразно провести исследование характеристик такого тягового двигателя и определить целесообразность его внедрения.

На новых электровозах, электропоездах и тепловозах для железных дорог России

устанавливают асинхронные тяговые электродвигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора («беличьей клеткой»). Для такой конструкции ротора в научной литературе и патентах разных лет найдено техническое решение, связанное с изготовлением не радиальных пазов (рис. 1а), а с наклоном относительно радиуса (рис. 1б). Согласно Г. К. Жерве, такая конструкция «беличьей клетки» позволяет увеличить мощность электродвигателя [5].

Новизна настоящего исследования заключается в том, что найденная конструкция пазов ротора будет изучаться не с точки зрения увеличения мощности, а с точки зрения снижения потерь мощности в двигателе.

Экспериментальное исследование

Анализ литературы показал, что широкое применение физические модели электрических машин ранее нашли, в частности, в экспериментальных исследованиях кафедры электромеханики Московского энергетического института [6].

Для решения задачи экспериментального исследования влияния наклона пазов ротора на потери энергии в электродвигателе в рамках настоящего исследования был в лабораторных условиях изготовлен микромакет двухфазного асинхронного электродвигателя (рис. 2) с двумя вариантами ротора, отличающимися формой пазов (рис. 1). Один ротор имеет прямые пазы, другой ротор имеет наклонные пазы. Площади сечения стержней «беличьей клетки» ротора одинаковы у обоих вариантов. Макет оборудован блоком задания и измерения фрикционной нагрузки. Измерение нагрузки производилось динамометром во время отключения электропитания. Также стенд оборудован такими измерительными приборами, как лазерный тахометр, ваттметр, амперметр, вольтметр. Электродвигатель получает двухфазное синусоидальное электропитание от источника с регулируемым

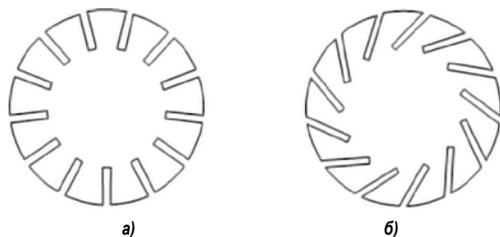


Рис. 1. Сравнимые варианты конструкции пазов ротора: а – прямые пазы, б – наклонные пазы [рисунки авторов].

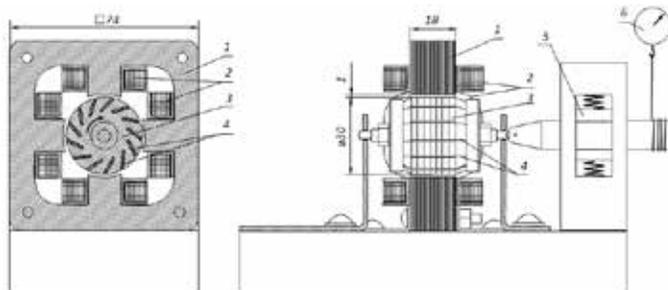


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – статор; 2 – обмотки статора; 3 – ротор; 4 – проводники ротора; 5 – регулируемая фрикционная нагрузка; 6 – динамометр [схема авторов].

Таблица 1

Результаты испытаний макета двухфазного асинхронного двигателя с роторами с прямыми и наклонными пазы [экспериментальные данные авторов]

Направление вращения	Средние значения по двум направлениям	вперёд	назад
Форма пазов ротора	прямые	наклонные	наклонные
Частота вращения n , об/мин	1579	1574	1613
Момент M , Н·м	0,00209	0,00213	0,00212
Мощность двигателя P_2 , Вт	0,341	0,349	0,353
Ток фазы статора $I_{\phi 1}$, А	0,548	0,398	0,627
напряжение фазы статора $U_{\phi 1}$, В	22,06	13,43	21,41
Потребляемая мощность P_1 , Вт	11,04	8,06	14,04
Коэффициент мощности $\cos \phi$ (усреднённый по 20 значениям)	0,468	0,741	0,517
Потери ΔP , Вт	10,70	7,71	13,69

уровнем напряжения. Значение выбранной частоты питающего напряжения составило 182 Гц. Это значение соответствует частоте питания тяговых двигателей электровоза ЭП20 при максимальной скорости движения.

В процессе испытаний проводились запуски макета двигателя при плавном увеличении напряжения питания с фиксацией показаний приборов при частотах вращения 1200, 1800,

2200 об/мин. Было выполнено по 20 измерений для каждого из трёх вариантов конфигурации двигателя: прямые пазы, пазы с наклоном в направлении вращения ротора, пазы с наклоном против направления вращения ротора.

Результаты измерений приведены в таблице 1.

Коэффициент мощности определялся по следующему соотношению [7]:

$$\cos \phi = \frac{P_1}{m U_{\phi 1} I_{\phi 1}},$$

где $m = 2$ – число фаз статора макета двигателя;

P_1 – потребляемая макетом двигателя мощность, Вт;

$U_{\phi 1}$ – напряжение фазы статора, В;

$I_{\phi 1}$ – ток фазы статора, А.

В процессе испытаний зарегистрировано снижение на 28 % потерь мощности ΔP в электродвигателе в направлении вращения, указанном стрелкой на рис. 2, после установки ротора с наклонными пазы при сопоставимых моментах и частотах вращения. При этом в направлении вращения, противо-

Таблица 2
Анализ потерь мощности, кВт, в тяговых электродвигателях типовой и разработанной конструкций [расчетные данные авторов]

Конструктивный элемент	Типовая конструкция	Разработанная конструкция с наклонными пазы ротора
Стальной пакет статора	12,59	13,97
Обмотка статора	10,62	9,86
Медная клетка ротора	0,22	0,20
Стальной пакет ротора	28,04	23,41
Подшипники	5,54	5,54

положном указанному стрелкой на рис. 2, зарегистрированы повышенные потери мощности ΔP .

В макете инновационного двигателя в прямом направлении вращения зарегистрировано значительное увеличение коэффициента мощности $\cos \phi$ на 58 % по сравнению с классическим вариантом.

Исследование асинхронного тягового двигателя с наклонными пазами ротора для пассажирского электровоза

С целью оценки эффективности применения найденного в литературе [5] технического решения в конструкции тягового двигателя ДТА-1200А пассажирского электровоза ЭП20¹ [8] было выполнено двухмерное компьютерное моделирование магнитного поля и электрохимических процессов с помощью конечно-элементного программного пакета COMSOL, также использованного в работах [9–11] (для моделирования электромагнитных процессов учёные используют также программные пакеты ANSYS Maxwell [12–14], ELCUT [15], ELMEC, FEATool, FEMM [16], Siemens Simcenter MAGNET, Simcenter Motorsolve, JMAG Designer [17], ANSYS Motor-CAD).

В продолжительном режиме работы при мощности 1100 кВт и частоте вращения 1766 об/мин минимум потерь мощности в тяговом электродвигателе соответствует углу наклона пазов ротора 12° к радиальному направлению ротора. Это значение угла оказалось максимально реализуемым по условию выполнения баланса мощности для двигательного режима:

$$mU_{\phi 1} I_{\phi 1} \cos \phi = P_2 + \Delta P,$$

при этом потребовалось увеличить толщину и уменьшить высоту зубцов за счёт уменьшения ширины и глубины пазов для недопущения снижения магнитного потока, величина которого связана с напряжением питания.

За счёт такой оптимизации геометрии магнитопровода двигателя с точки зрения продолжительной работы в одном из направлений вращения в разработанном тяговом электродвигателе потери мощности снижаются на 7 %

¹ ТС.085.003 РЭЗ Электровоз магистральный ЭП20. Руководство по эксплуатации. Книга 3. Электрические машины. ООО «ТРТранс», 2012. – 21 с.

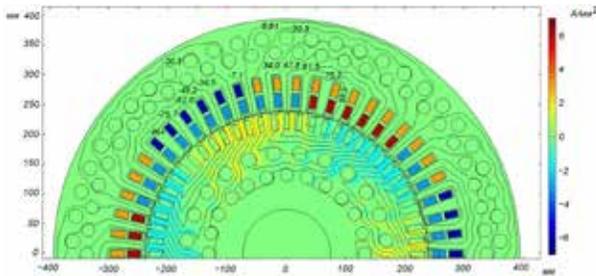


Рис. 3. Асинхронный тяговый двигатель ДТА-1200А электровоза ЭП20: токораспределение и векторный потенциал электромагнитного поля, мВб/м, в поперечном сечении в продолжительном режиме работы [расчётные данные авторов].

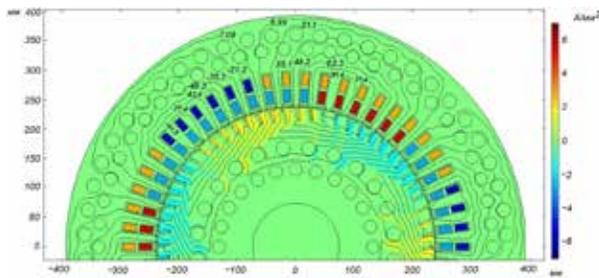


Рис. 4. Проект инновационного тягового двигателя: токораспределение и векторный потенциал электромагнитного поля, мВб/м, в поперечном сечении в продолжительном режиме работы [расчётные данные авторов].

за счёт снижения потерь мощности в стали ротора на 17 % (табл. 2). Снижение потерь в обмотке статора и медной короткозамкнутой клетке ротора вызвано снижением потребляемого тока на 3,8 %, повышение потерь в стальном пакете статора вызвано повышением магнитного потока на 3,4 %.

Существующий вариант конструкции тягового двигателя с результатами моделирования магнитного поля представлен на рис. 3. Разработанный инновационный вариант тягового двигателя с результатами моделирования магнитного поля представлен на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования методами эксперимента и математического моделирования продемонстрирован энерго-сберегающий эффект применения выбранного технического решения – оригинальной конструкции пазов ротора асинхронного электродвигателя, имеющих наклон к радиальному направлению ротора.

С помощью компьютерного моделирования рассчитан технический эффект применения выбранного технического решения в конструкции тягового асинхронного элект-



родвигателя пассажирского электровоза, заключающийся в снижении потерь мощности в двигателе на 7 %.

Анализ конечно-элементной модели двигателя выявил снижение потерь мощности в большинстве конструктивных элементов двигателя: в стальном пакете ротора на 17 %, в медной клетке ротора на 9 %, в обмотке статора на 7 % при повышении потерь мощности в стальном пакете статора на 11 %.

Предлагаемая конструкция двигателя позволяет снизить его потери мощности на 7 % и потребляемый ток на 3,8 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yang, Yu. Synchronous Machine for Unidirectional Application. Master thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2012. [Электронный ресурс]: <https://studylib.net/doc/18711791/synchronous-machine-for-unidirectional-application?ysclid=ls4osyiv8h214895671>. Доступ 26.07.2023.
2. Petrov, I., Ponomarev, P., Pyrhönen, J. Asymmetrical Geometries in Electrical Machines. International Review of Electrical Engineering, 2016, February, Vol. 11, Iss. 1. DOI: 10.15866/iree.v11i1.7739.
3. Zahangir, T. Analysis of asymmetrical features of an electric machine. Master of Science Thesis – Göteborg, Chalmers University of Technology, 2018. [Электронный ресурс]: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/256298/256298.pdf>. Доступ 26.07.2023.
4. Виноградов А. А., Шишов А. В., Седов М. К., Каиров А. А., Сидоров А. О. Патентообладатель Шишов А. В. Патент RU180432U1 Российская Федерация, МПК H02K 99/00. Электродвигатель с косыми магнитными полями / № 2017120558; заявл. 14.06.17; опубл. 14.06.18, Бюл. № 17. [Электронный ресурс]: <https://patents.google.com/patent/RU180432U1/ru>. Доступ 26.07.2023.
5. Жерве Г. К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 400 с. ISBN 5-283-04458-0.
6. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. – М.: Энергия, 1969. – 304 с.
7. Находкин М. Д., Василенко Г. В., Бочаров В. И., Козорезов М. А. Проектирование тяговых электрических машин. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
8. Зарифьян А. А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока / Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, РГУПС, 2016. – 24 с. [Электронный ресурс]: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006653235/. Доступ 26.07.2023.
9. Автайкин И. Н., Квон А. М. Сравнительный анализ эффективности использования активных материалов радиальных и аксиальных асинхронных машин электро-

привода технологических установок // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2019. – № 1 (367). – С. 70–73. EDN: YZILPF.

10. Казаков Ю. Б., Стулов А. В., Никифоров М. И., Киселев М. А. Разработка и исследование тягового синхронного электродвигателя с инкорпорированными в ротор магнитами для электромобиля // Вопросы электротехнологии. – 2022. – № 2 (35). – С. 89–97. EDN: VRBTEM.

11. Чирков Д. А., Ключников А. Т., Коротаев А. Д., Тимашев Э. О. Сравнение методов расчёта электромагнитных процессов на примере цилиндрического линейного вентильного двигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 76–91. EDN: VQADWU.

12. Ермолаев А. И., Гордеев Б. А., Охулков С. Н., Титов Д. Ю. Программа для исследования магнитного шума и вибрации асинхронного электродвигателя // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022669927, 26.10.2022. Заявка № 2022669399 от 21.10.2022. EDN: KNGBEV.

13. Ермолаев А. И., Ерофеев В. И., Плехов А. С., Титов Д. Ю. Исследование магнитной вибрации асинхронного электродвигателя посредством МКЭ-моделирования // Интеллектуальная электротехника. – 2021. – № 3 (15). – С. 37–56. EDN: QZGGPR.

14. Сироткин В. В., Пигалев Д. А., Больших И. В., Черняев С. С. Применение специализированного программного обеспечения для расчета распределения магнитного поля в витках обмотки статора вентильно-индукторных электродвигателей // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 58–73. EDN: RFMZKH.

15. Симаков А. В., Огневский А. С. Моделирование режимов работы тягового электродвигателя методом конечных элементов // В сб.: Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте. Материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки. – Омск: ОмГУПС, 2019. – С. 196–201. EDN: UZOSKZ.

16. Авдеев А. И. Автоматизация расчета магнитного поля асинхронного электродвигателя в программе FEMM // В сб.: «Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве)». Сб. тр. XVIII международной научно-техн. конференции студентов и аспирантов: в 3 т. – Т. 1. – Смоленск, 2021. – С. 121–126. EDN: JXYDOE.

17. Волков С. В., Горячев О. В., Ефромеев А. Г., Степочкин А. О. Расчет параметров математической модели электрического шагового двигателя гибридного типа на основе анализа картины магнитоэстетического поля // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – № 8. – С. 482–489. <https://doi.org/10.17587/mau.20.482-489>.

Информация об авторах:

Зуев Александр Сергеевич – аспирант кафедры электропоездов и локомотивов Российского университета транспорта, Москва, Россия, aleksandr-zuev-1987@mail.ru.

Глуценко Михаил Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры электропоездов и локомотивов Российского университета транспорта, Москва, Россия, tr.gluschenko@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 23.11.2022, одобрена после рецензирования 27.06.2023, принята к публикации 01.08.2023.

• Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 60–64

Зуев А. С., Глуценко М. Д. Исследование асинхронного тягового электродвигателя с наклонными пазами ротора