

УДК 621.333.3

ББК 0152

М.Ю. СИДОРОВ, А.Г. КАЛИНИН, В.А. БАКШАЕВ,
Е.Л. ГОРШКОВ, Е.Е. ГОРШКОВ

ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ШАССИ ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА*

Ключевые слова: многофазный электродвигатель, аксиальный мотор, магнитные материалы, КПД электрических машин.

Цель исследования – импортозамещение тяговых электроприводов в рамках субсидируемого проекта по созданию в Чувашии серийного производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом.

Для многих транспортных электродвигателей работа в режиме высокомоментного электродвигателя не является основным режимом работы, поскольку разгон транспортного средства осуществляется за короткое время с преодолением низкоэффективных тихоходных режимов. Отличительной особенностью тягового электродвигателя для шасси фронтального погрузчика является перестановка приоритетов в пользу целевых эксплуатационных технологических режимов.

Приведены аналитические результаты этапа эскизного проекта тягового электродвигателя каждого колеса для шасси фронтального погрузчика с гибридной электрической трансмиссией. Расчетным путем установлено, что для заданных тягово-динамических, температурных и габаритных характеристик наиболее эффективен вентильный тип двигателя с постоянными редкоземельными магнитами NdFeB, число фаз – 6, магнитная система радиальная с тангенциальными магнитными подпорами, немагнитный зазор – 3 мм, бандаж на основе углеродной нити, охлаждение принудительное жидкостное. Наибольший КПД, 92%, приходится на цикл тяжелых эксплуатационных режимов погрузчика. Установлено также, что затраты на производство двигателя с аксиальной магнитной системой выше по сравнению с таковыми при производстве двигателей цилиндрического типа при условии равенства электромагнитной мощности.

Приведено обоснование выбора магнитной системы на основе соотношений магнитных потоков для разных в комбинациях полюсов ротора и зубцов статора. В материалах статьи иллюстрируются эпюры магнитных полей и распределение температур тягового электродвигателя, рассчитанные на этапе эскизного проектирования методом конечных элементов, а также габаритный чертеж эскиза электродвигателя для заданных эксплуатационных характеристик, переданный на стадию технического проектирования.

Рассматриваемый тяговый электродвигатель (ТЭД) предназначен для работы в составе движителя шасси фронтального погрузчика как силового элемента, сопряженного выходным валом с колесным редуктором. Транспортные электродвигатели в отличие от стационарных общепромышленных имеют большой рабочий диапазон частот вращения с поддержанием постоянства мощности, обеспечивающий требуемые скорости движения транспортных средств. Кроме того, транспортные электродвигатели при низких скоростях

* Материал опубликован в рамках реализации этапа государственного контракта «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом» (идентификатор государственного контракта № 000000S407521QLX002).

вращения работают в режиме постоянства высоких значений моментов вращения для повышения динамических (разгонных) характеристик транспортного средства.

Для многих транспортных электродвигателей работа в режиме высокомоментного электродвигателя не является основным режимом работы, поскольку разгон транспортного средства осуществляется за короткое время с преодолением низкоэффективных тихоходных режимов. Отличительной особенностью тягового электродвигателя фронтального погрузчика является перестановка приоритетов в пользу целевых эксплуатационных технологических режимов. Основным режимом работы становится режим с постоянством высокого значения момента в области низких скоростей вращения. В свою очередь, это ужесточает требования по тепловым и механическим характеристикам, особенно для степени защиты IP65, установленной для фронтального погрузчика, а также изменяет подход к оптимальному алгоритму управления электродвигателем.

Согласно техническому заданию для основного технологического цикла погрузчика ТЭД должен обеспечивать номинальный момент 500 Нм, максимальный момент перегрузки не менее 1000 Нм, номинальную частоту вращения 450 об./мин. В транспортном технологическом цикле на максимальной скорости движения момент должен быть не менее 50 Нм при частоте вращения 4500 об./мин. Габарит по длине и диаметру (без вала и кабелей) должен быть не больше 430 мм.

При диапазоне скоростей вращения 10, двукратной перегрузке по моменту и заданных габаритах выбор типа электродвигателя сделан в пользу бесконтактных электродвигателей постоянного тока с ротором на постоянных редкоземельных магнитах (БДПТ), поскольку они обладают высокими удельными характеристиками и устойчивой работой при больших кратностях и моментах. В качестве постоянных магнитов приняты редкоземельные NdFeB с индукцией 1,2 Тл и коэрцитивной силой 830 кА/м с рабочей температурой до 180°C.

На основе анализа машинной постоянной Арнольда [1, 4] на этапе эскиза выбор диаметра расточки статора ТЭД выбран 360 мм и заложен в основу проектирования всех остальных узлов ТЭД. Диаметр ротора подбирался из заданного немагнитного зазора 3 мм, однако ротор ТЭД при 4500 об./мин имеет окружную скорость постоянных магнитов, близкую к 60 м/с, что требует их бандажирования. Поскольку толщина бандаж имеет определяющее влияние на величину рабочего зазора ТЭД, выбор сделан в пользу углеродной нити УКН/5000 ГОСТ 28008-88, что позволило сохранить немагнитный зазор не более 3 мм.

Выбор оптимального числа пар полюсов ротора для наружного диаметра 259 мм (по магнитам) осуществлялся исходя из оптимального соотношения магнитного потока и потерь на перемагничивание в магнитопроводе статора. Данные по изменению магнитного потока в зависимости от числа полюсов ротора приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчитанное соотношение магнитного потока

Показатели	Число зубцов статора			
	9	12	18	18
Число полюсов ротора, Z_p	8	10	12	16
Частота перемагничивания на максимальной скорости вращения, Гц	300	375	450	600
Поток полюса, радиальный ротор, Вб	0,0098	0,00775	0,0063	0,00497
Поток полюса, радиально-тангенциальный ротор, Вб	0,011	0,009	0,0076	0,0062
Полный поток, Вб	0,044	0,045	0,0456	0,0496

Магнитная система с числом пар полюсов $p = 8$ является оптимальной по магнитному потоку, но в связи с высокой частотой перемагничивания магнитопровода статора на максимальной рабочей скорости вращения электродвигателя (600 Гц) имеет высокие удельные потери. Магнитная система с числом пар полюсов $p = 4$ имеет минимальные потери на максимальной частоте вращения ротора, но большая пульсация момента увеличивает радиальные нагрузки на подшипник в связи с усилием, вызванным несимметрией питания фаз статора. Это снижает надежность подшипниковых узлов, особенно при длительной работе в высокомоментном режиме. Магнитная система с числом пар полюсов $p = 6$ имеет большой статический момент, вызывающий дополнительные энергетические затраты и ударные нагрузки на корпус ТЭД при начале движения и останове транспортного средства, что особенно критично при повторно-кратковременном цикле работы. Магнитная система с числом пар полюсов $p = 5$ по сравнению с системой $p = 8$ имеет более низкие удельные потери из-за понижения частоты перемагничивания (375 Гц) с незначительным снижением суммарного потока ротора, кроме того, эта магнитная система с $p = 5$ имеет преимущество в возможности реализации обмотки статора как с числом фаз $m = 3$, так и с числом фаз $m = 6$ при выбранном соотношении числа пазов статора на полюс и фазу ротора. Эскизное проектирование ТЭД было сосредоточено на магнитной схеме «12–10» с добавлением магнитных подпорков.

Существуют следующие типы магнитных систем ротора БДПТ с возбуждением от постоянных магнитов: ротор «звездочка» с призматическими радиально намагниченными магнитами; ротор коллекторного типа с призматическими тангенциально намагниченными магнитами; ротор совмещенный, радиально-тангенциального типа, собранный по системе «Хальбаха» (рис. 1).

Серия расчетов по выбору перечисленных типов магнитных систем ротора показала наилучшие значения для системы «Хальбаха», где полный магнитный поток ротора составил 0,045 Вб, при этом максимальная индукция в магнитопроводе статора для режима 1000 Нм не превышает 1,8 Тл, масса магнитов ротора, намагниченных по системе «Хальбаха», составила 21,2 кг, суммарная расчетная масса по активным частям электродвигателя не превысила 150 кг.

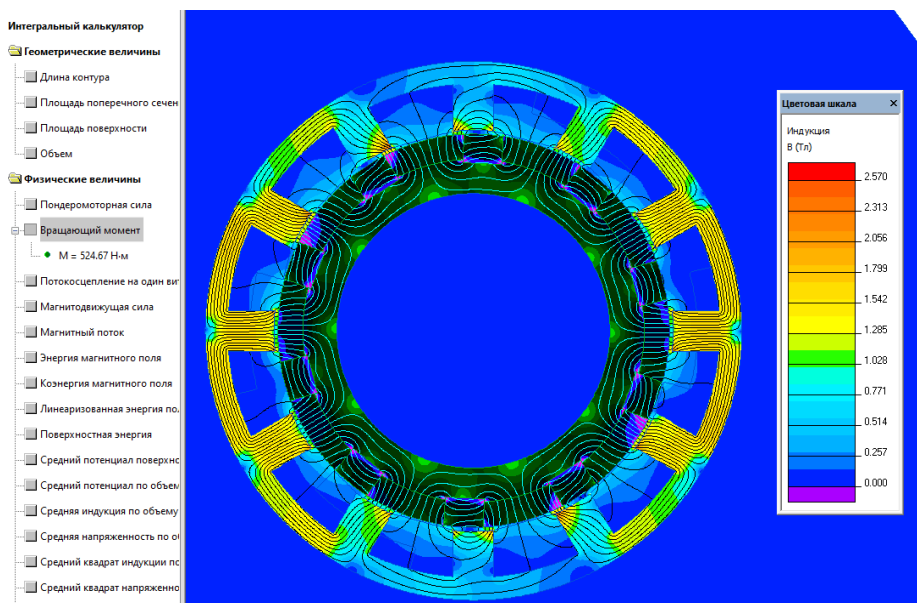


Рис. 1. Расчет электромагнитного момента для номинального режима работы ТЭД с ротором по системе «Хальбаха» в схеме «12–10»

Тепловой расчет ТЭД выполнен согласно методикам, приведенным в [2, 3], картина распределения тепловых потоков показана на рис. 2. Применено жидкостное охлаждение общепромышленными антифризами посредством циркуляции в трубках, установленных в наружной перфорации статорного железа. Средняя температура катушек составила 90°C , максимальная температура на поверхности магнитов не превысила 80°C .

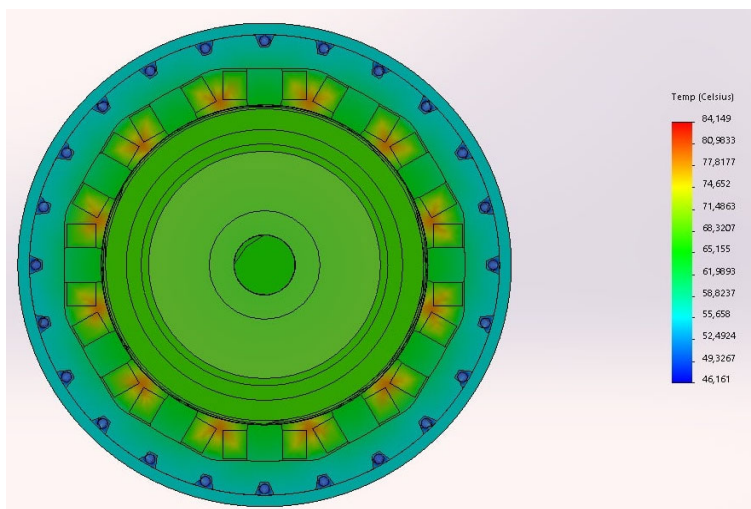


Рис. 2. Эпюра тепловых полей ТЭД

В ходе исследований было выполнено сравнение цилиндрического и торцевого (аксиального) исполнений электродвигателя исходя из условий равенства их электромагнитной мощности (рис. 3). Определяющим параметром при сопоставлении электродвигателей были габаритные размеры, где для обоих исполнений принят наружный диаметр по активным частям не более 360 мм.

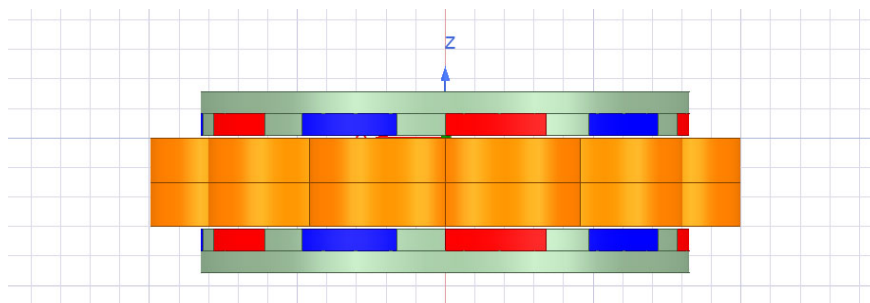


Рис. 3. Конструкция ТЭД аксиального типа:
Z – ось ротора с магнитами

Принципиальным отличием двух исполнений электродвигателя является полный немагнитный зазор. Для цилиндрического исполнения зазор составляет – 3 мм (см. рис. 1), для торцевого исполнения зазор задан – 2 мм (см. рис. 3).

Сравнение энергетических параметров для цилиндрической и торцевой магнитной системы электродвигателей приведено в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета магнитного потока для ТЭД разного исполнения

Показатели	Тип исполнения электродвигателя	
	цилиндрическое	торцевое (аксиальное)
Высота полюса, мм	16,5	13
Зазор, мм	3	2
Тип магнитной системы ротора	с тангенциально намагниченными магнитами, система «Хальбаха»	с тангенциально намагниченными магнитами, система «Хальбаха»
Поток полюса в рабочем зазоре, Вб	0,0092	0,00912
Полный поток электродвигателя, Вб	0,046	0,0456
Общая масса магнитов ротора, кг	21,2	18,1

На рис. 4 показан эскиз ТЭД для шасси фронтального погрузчика по результатам аналитических расчетов, сходящихся к заданным характеристикам габарита и мощности.

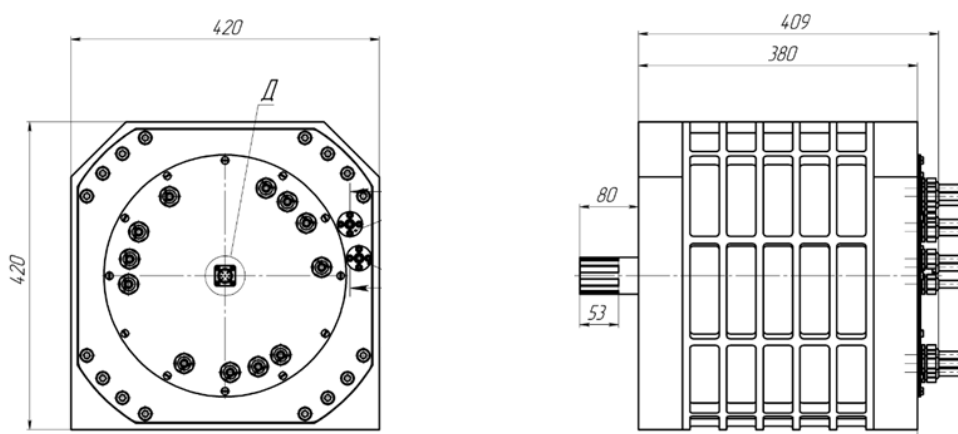


Рис. 4. Эскиз ТЭД для шасси фронтального погрузчика (размеры в миллиметрах)

Выводы. 1. При одном и том же потоке в зазоре масса магнитов торцевого исполнения меньше массы магнитов цилиндрического исполнения, однако на энергетические параметры электродвигателя влияет площадь паза под обмотку статора, где расчетами установлено, что для обмотки машины торцевого типа она меньше в 1,14 раза. Как следствие, поток аксиальной машины должен быть увеличен относительно цилиндрической в 1,14 раза, что требует увеличения массы магнитов ротора аксиальной машины. Разница в массе магнитов цилиндрического и торцевого исполнения отличается на 17%, что не дает существенного преимущества в затратах на материалы.

Проведенные предварительные конструктивный и технологический анализы показали необходимость совмещения и дальнейшей юстировки двух аксиальных электродвигателей с общим валом и обеспечения их синхронизма в обоих режимах работы ТЭД. Это усложняет конструкцию и оснастку для изготовления моторов аксиального типа и практически нивелирует затраты на превосходящую массу магнитов в двигателях цилиндрического типа. Кроме того, для обеспечения оптимизации потерь в ТЭД аксиального типа предпочтительно использование порошковых магнитных материалов типа Somaloy, серийное производство которых в России отсутствует.

2. Результаты проведенных расчетов цилиндрического варианта исполнения ТЭД показали возможность его реализации на основе отечественных материалов с использованием универсального оборудования и нестандартной оснастки без привлечения уникальных технологий.

Литература

1. Вольдек А.И. Электрические машины. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
2. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин: пер. с нем. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 264 с.
3. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник / пер. с англ. В.В. Яковлева, В.И. Колядина. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
4. Шуйский В.П. Расчет электрических машин / сокр. пер. с нем. Б.А. Цветкова и И.З. Богуславского. Л.: Энергия; Ленингр. отд-ние, 1968. 731 с.

СИДОРОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ – кандидат технических наук, генеральный директор, АО «Специальное машиностроительное конструкторское бюро», Россия, Санкт-Петербург (sidorov@smbdb.ru).

КАЛИНИН АЛЕКСЕЙ GERMANOVICH – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (humanoid1984@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4598-507X>).

БАКШАЕВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ – генеральный директор, ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», Россия, Чебоксары (zaosspel@yandex.ru).

ГОРШКОВ ЕВГЕНИЙ ЛЬВОВИЧ – инженер, АО «Специальное машиностроительное конструкторское бюро», Россия, Санкт-Петербург (gorshkov.el@yandex.ru).

ГОРШКОВ ЕВГЕНИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – инженер, АО «Специальное машиностроительное конструкторское бюро», Россия, Санкт-Петербург (gorshkov.el@yandex.ru).

Mikhail Yu. SIDOROV, Aleksey G. KALININ, Vladimir A. BAKSHAEV,
Evgeny L. GORSHKOV, Evgeny E. GORSHKOV

TRACTION MOTOR FOR FRONT LOADER CHASSIS

Key words: multiphase electric motor, axial-flux motor, magnetic materials, efficiency of electrical machines.

The purpose of the work is the import substitution of traction electric drives as part of the project to create in the Chuvash Republic a serial production of a family of front loaders with a hybrid electric drive.

For most transport electric motors, operation in the high-torque electric motor mode is not the main operating mode, since the vehicle acceleration is carried out in a short time with overcoming low-efficiency low-speed modes. A distinctive feature of the traction motor for the chassis of a front loader is the rearrangement of priorities in favor of operating technological modes.

The analytical results of the stage of the preliminary design of the traction electric motor of each wheel for a front loader with a hybrid electric transmission are presented. Based on the results of calculations, it was found that for the given traction-dynamic, temperature and overall characteristics, the most efficient type of engine is NdFeB magnet motor, the phase ratio is 6, the magnetic system is radial with magnetic supports, the non-magnetic gap is 3 mm, the shroud is based on a carbon filament, cooling is forced liquid, the highest efficiency of 92% falls on the cycle of heavy operating modes of the front loader. The cost of manufacturing a motor with an axial magnetic system is higher compared to cylindrical type motors provided the electromagnetic power is equal.

The choice of a magnetic system based on the ratio of magnetic fluxes of different combinations of rotor poles and stator teeth is substantiated. The materials of the article illustrate diagrams of magnetic fields and temperature distribution of the traction motor, calculated at the stage of preliminary design by the finite element method, as well as a dimensional drawing of a sketch of an electric motor for given performance characteristics, transferred to the stage of technical design.

References

1. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny. 3-e izd.* [Electric motors. 3rd ed.]. Leningrad, Energiya Publ., 1978, 832 p.
2. Gotter G. *Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen.* Berlin-Heidelberg, Springer-Verl., 1954 (Russ. ed.: *Nagrevanie i okhlazhdenie elektricheskikh mashin.* Moscow, St. Petersburg, Gosnengroizdat Publ., 1961, 264 p.).

3. Wong H.Y. Handbook of essential formulae and data on heat transfer engineers. London, New York, 1977 (Russ. ed.: *Osnovnye formuly i dannye po teploobmenu dlya inzhenerov*. Moscow, Atomizdat Publ., 1979, 216 p.).

4. Shuiskii V.P. *Raschet elektricheskikh mashin* [Calculation of electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1968, 731 p.

MIKHAIL Yu. SIDOROV – Candidate of Technical Sciences, Director, Special Machine-Building Design Bureau, Russia, St. Petersburg (sidorov@smbdb.ru).

ALEKSEY G. KALININ – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Technologies, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (humanoid1984@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4598-507X>).

VLADIMIR A. BAKSHAEV – Director, Cheboksary Enterprise «Sespel», Russia, Cheboksary (zaospel@yandex.ru).

EVGENY L. GORSHKOV – Engineer, Special Machine-Building Design Bureau, Russia, St. Petersburg (gorshkov.el@yandex.ru).

EVGENY E. GORSHKOV – Engineer, Special Machine-Building Design Bureau, Russia, St. Petersburg (gorshkov.el@yandex.ru).

Формат цитирования: Сидоров М.Ю., Калинин А.Г., Бакишев В.А., Горшков Е.Л., Горшков Е.Е. Тяговый электродвигатель для шасси фронтального погрузчика // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 95–102. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-95-102.