

DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-130-139

УДК 62-843

ББК О951.4

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

**ТРАНСМИССИОННЫЙ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР
ДЛЯ ПИТАНИЯ ПРИВОДА ШАССИ
ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА***

Ключевые слова: стартер-генератор, магнитные материалы, КПД электрических машин, жидкостное охлаждение.

Для тяжелой строительной техники с гибридной электрической трансмиссией центром питания группы тяговых электроприводов могут быть электрогенератор и возобновляемый накопитель энергии (массив аккумуляторов) с возможностью их совместной работы для обеспечения рывка тока в группе тяговых электроприводов. Массив аккумуляторов может быть использован для питания генератора в режиме стартера при запуске дизельного двигателя внутреннего сгорания.

Цель исследования – обоснование выбора магнитной системы силового генератора для электрической трансмиссии и возможности режима стартера приводного двигателя внутреннего сгорания. Исследование выполнено в рамках субсидируемого проекта по созданию в Чувашии серийного производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом.

Материалы и методы исследования. Исследование проводилось методом конечно-элементного анализа с применением отечественного программного продукта ELCUT (профессиональная версия и набор справочников отечественных электротехнических и магнитных материалов).

Результаты исследования. На этапе эскизного проектирования сделан аналитический расчет параметров активных частей трансмиссионного электрогенератора при соблюдении следующих условий: применение отечественных электротехнических и магнитных материалов, использование общепромышленных подшипников и антифризов, обеспечение совместимости с имеющейся технологической оснасткой в производстве тяговых электродвигателей, выполнение функции стартера для приводного двигателя внутреннего сгорания. Приведено обоснование выбора магнитной системы на основе соотношений магнитных потоков разных размеров зубцов статора. Статья иллюстрирована эпюрами магнитных и тепловых полей для заданных эксплуатационных характеристик и свойств трансмиссионного электрогенератора.

Выводы. Для заданного типа приводных дизельных двигателей, устанавливаемых на фронтальные погрузчики, наилучшие показатели эффективности предлагаемой магнитной системы генератора имеют место при использовании мультипликатора. Питание генератора в режиме стартера обеспечивается установленным массивом тяговых аккумуляторов фронтального погрузчика без дополнительных повышающих преобразователей.

Одним из основных требований при освоении серийного производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридной электрической трансмиссией

* Исследования выполнены Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» в реализации комплексного проекта по договору № 517-21 от 22 апреля 2021 г. при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-11-2021-051 от 24 июня 2021 г.

является преимущественное использование серийных средств, материалов и компонентов отечественной промышленности.

Трансмиссионный электрогенератор (ТЭГ) предназначен для работы в качестве центра электропитания для группы тяговых электроприводов шасси фронтального погрузчика и заряда возобновляемого накопителя энергии при приобретении вращения от дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), а также для реализации функции стартера ДВС. В связи с этим центр питания транспортного средства должен обеспечивать совместимость заданных характеристик дизельного двигателя серии ЯМЗ-53445 с системой впрыска Common Rail, учитывать свойства последовательно включенных аккумуляторных свинцово-кислотных накопителей энергии серии ЯМАЛ 6СТ и свойства тяговых электродвигателей (ТЭД) [4, 6], что в совокупности является исходными данными для исследований. Сопутствующие преобразовательные устройства должны удовлетворять техническому уровню развития силовой преобразовательной техники [1, 9, 10]. К исходным данным также следует отнести ряд важнейших эксплуатационных режимов:

- степень защиты оболочки – IP65 от строительной запыленной среды эксплуатации транспортного средства, а также от паров горючих жидкостей подкапотного пространства;

- охлаждение жидкостное, отдельное от ДВС, входная температура антифриза – 40°C;

- рабочая температура активных частей магнитной системы – не выше 180°C для применения NeFeB магнитов;

- марка листа статора и внутренний диаметр пакета статора 264 мм в целях сохранения общности технологической оснастки в производстве ТЭД и генератора;

- выходная ЭДС – 380 В для применения в схеме мостового выпрямителя к величине не менее 500 В, необходимой для тягово-динамической характеристики ТЭД на его высшей частоте вращения [4].

Цель исследования – обоснование выбора магнитной системы силового генератора для электрической трансмиссии и возможности режима стартера приводного двигателя внутреннего сгорания. Исследование выполнено в рамках субсидируемого проекта по созданию в Чувашии серийного производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом.

Согласно публикациям [6], установленная мощность электроприемников для полноприводной схемы четырехколесного фронтального погрузчика составляет порядка 100 кВт. Располагаемая скоростная характеристика ДВС типа ЯМЗ-53445-20 (рис. 1) указывает на оптимальные обороты коленвала для генерации мощности – 1600 об./мин во всем диапазоне нагрузок с учетом расчетных КПД полупроводниковых преобразований в цепях приводов – 0,94.

Режим стартера для ДВС заданного типа требует следующих характеристик ТЭГ в режиме двигателя, полученных приведением к коленвалу открытых технических данных электрических стартеров типа СТАРТЕР 5432.3708-01 и их аналогов:

- частота вращения коленвала ДВС не менее 100 об./мин;

- сообщаемый коленвалу ДВС момент вращения не менее 730 Нм;
- располагаемое напряжение от массива аккумуляторов 60 В.

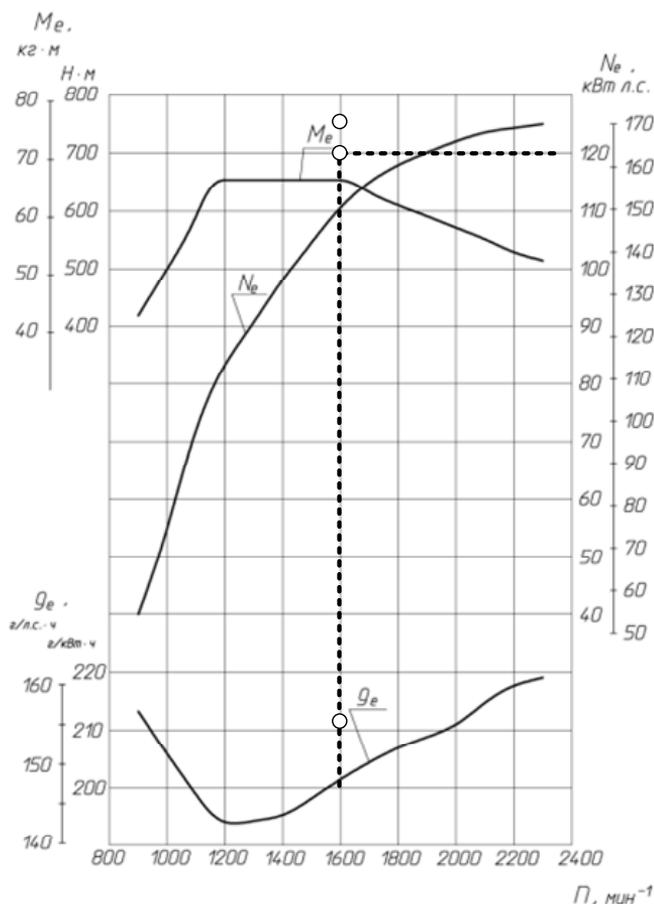


Рис. 1. Скоростная характеристика двигателя ЯМЗ-53445-20:
 M_e – крутящий момент брутто; N_e – номинальная мощность брутто;
 g_e – удельный расход топлива; n – частота вращения коленчатого вала

Наличие в составе ДВС типа ЯМЗ-53445-20 системы впрыска Common Rail позволяет стабилизировать частоту вращения в пределах 5% относительно номинальной во всем диапазоне нагрузок. Высокая стабильность оборотов коленвала ДВС позволяет реализовать ТЭГ на основе вентильной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов ротора.

Основными преимуществами вентильных электрических машин являются высокие удельные характеристики, высокий КПД, отсутствие дополнительных обмоток управления. Вентильные электрические машины являются полностью обратимыми, что позволяет использовать их в качестве генератора и электродвигателя (стартера) без дополнительных конструктивных изменений [2, 5, 8].

Основным недостатком генераторов на основе вентильных электрических машин является практически линейная зависимость значения фазного напряжения от частоты вращения, что полностью компенсируется системой стабилизации скорости вращения ДВС.

Материалы и методы исследования. Расчеты производились методом конечно-элементного анализа в отечественном программном продукте ELCUT v. 6.6.0.2587 (профессиональная версия и набор справочников отечественных электротехнических и магнитных материалов).

Искомými параметрами ТЭГ для стадии технического проектирования являются габариты активных частей генератора и показатели эффективности магнитной системы, обеспечивающие низкие значения статического момента и высших гармоник выходного напряжения для снижения вибрационных и тепловых нагрузок на элементы привода.

Малогоабаритные магнитные системы типа 6/4, несмотря на привлекательные удельные характеристики, имеют ряд существенных недостатков, исключающих их применение для заданных условий. Большая окружная скорость магнитов при оборотах ротора не менее 6000 об/мин вызывает значительное увеличение рабочего зазора из-за необходимости бандажирования, что снижает КПД. Высокая частота перемагничивания требует снижения толщины листа статора и нарушает общность технологической оснастки для сборки статоров ТЭГ и ТЭД. Кроме того, параметр q (число пазов на полюс и фазу) в данной магнитной системе менее 1, что отрицательно влияет на форму выходного напряжения ТЭГ из-за высокой насыщенности МДС обмоток гармоническими составляющими дробных порядков, имеющими значительные амплитуды.

Проведенный анализ показал, что для оптимальной реализации требований к ТЭГ предпочтительно использование магнитных систем с $q = 2$ и укорочением шага обмоток статора. Применение укорочения шага обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу позволяет подавить высшие гармоники ближайших порядков 5 и 7, 11 и 13, снизить влияние гармонических зубцовых порядков на формирование МДС и ЭДС, шумы и вибрации ТЭГ, а также значительно снизить статический момент, значение которого находится в пределах 35 Нм, что менее 6% от номинального момента ДВС. Основным недостатком таких магнитных систем является увеличение лобовых частей обмоток статора, снижающих массогабаритные параметры ТЭГ на 9–12%, что не является кардинальным для элементов тяжелой строительной техники.

Рассмотрены магнитные системы профиля 36/6 для частот вращения 1600 об./мин – при непосредственном соединении вала генератора с коленвалом ДВС, 3000 об./мин – при соединении через мультипликатор с редукцией 1,87 и 4500 об./мин – при соединении через мультипликатор с редукцией 2,81. Материалы элементов магнитных систем рассматриваемых вариантов ТЭГ идентичны материалам ТЭД. Выбрана распределенная обмотка перекрестного типа с укорочением.

Результаты исследования. Результаты расчетов для режима генератора и режима стартера представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Расчетные данные магнитной системы 36/6 для режима генератора

Параметр	Габаритные размеры активных частей статора без учета лобных частей обмоток (D – диаметр наружный пакета статора; L – длина пакета статора)		
	$D = 380$ мм; $L = 375$ мм	$D = 380$ мм $L = 275$ мм	
Ширина зубцов статора, мм	9,5	11	9,5
Зазор полный немагнитный, мм	3	1,5	4,5
Частота вращения ротора, об./мин	3000	1600	4500
Частота перемагничивания магнитопровода статора, Гц	150	80	225
Поток полюса, Вб	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$2,74 \cdot 10^{-2}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$
Выходная мощность, кВт	110		
Число фаз	3		
Действующее значение фазного напряжения на выходе генератора, В	233		
Действующее значение фазного тока на выходе генератора, А	180		
Оценка выпрямленного напряжения в трехфазном мостовом выпрямителе, В	500		
Оценка выпрямленного тока, А	220		
Температура обмотки статора при начальной температуре охлаждающей жидкости 40°C, °C	120..130	180..190	180..190
Потери в меди статора, Вт	573	3660	669
Потери в стали статора, Вт	2700	1300	2700
КПД, о.е.	0,956	0,949	0,956

Таблица 2

Расчетные данные магнитной системы 36/6 для режима стартера

Параметр	Габаритные размеры активных частей статора без учета лобных частей обмоток (D – диаметр наружный пакета статора; L – длина пакета статора)		
	$D = 380$ мм $L = 375$ мм	$D = 380$ мм $L = 275$ мм	
Ширина зубцов статора, мм	9,5	11	9,5
Достижимая частота вращения маховика ДВС, об./мин	120		
Передаточное число мультипликатора	1,87	–	2,81
Частота вращения ротора, обеспечивающая старт ДВС через мультипликатор, об./мин	225	120	336
Момент на валу ротора, обеспечивающий старт ДВС через мультипликатор, Нм	390	730	261
Потребное напряжение питания постоянного тока, обеспечивающее частоту вращения для старта ДВС через мультипликатор, В	62	87	65
Потребляемый ток, А	168	127	168

На рис. 2 и 3 представлены рассчитанные эпюры магнитных и тепловых полей ТЭГ соответственно.

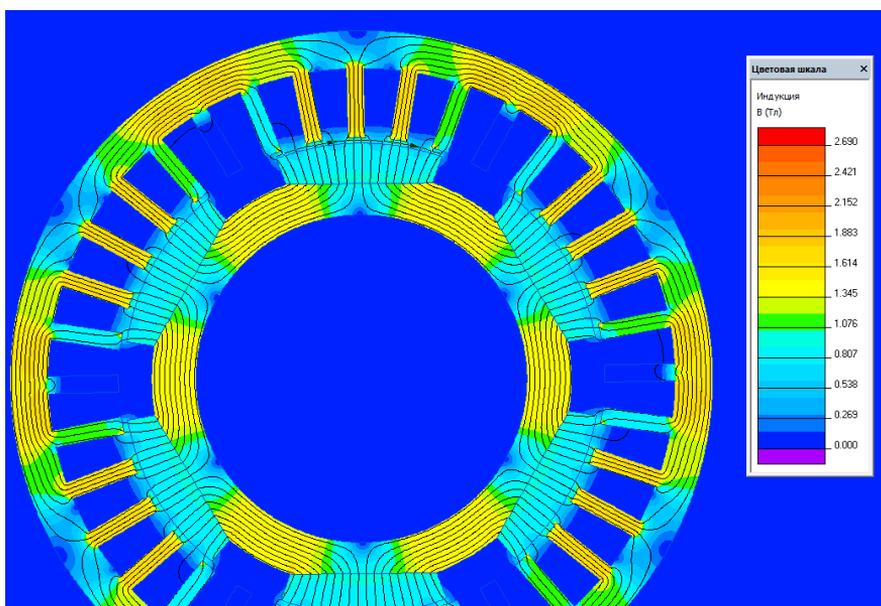


Рис. 2. Эпюра распределения магнитных полей стартёр-генератора

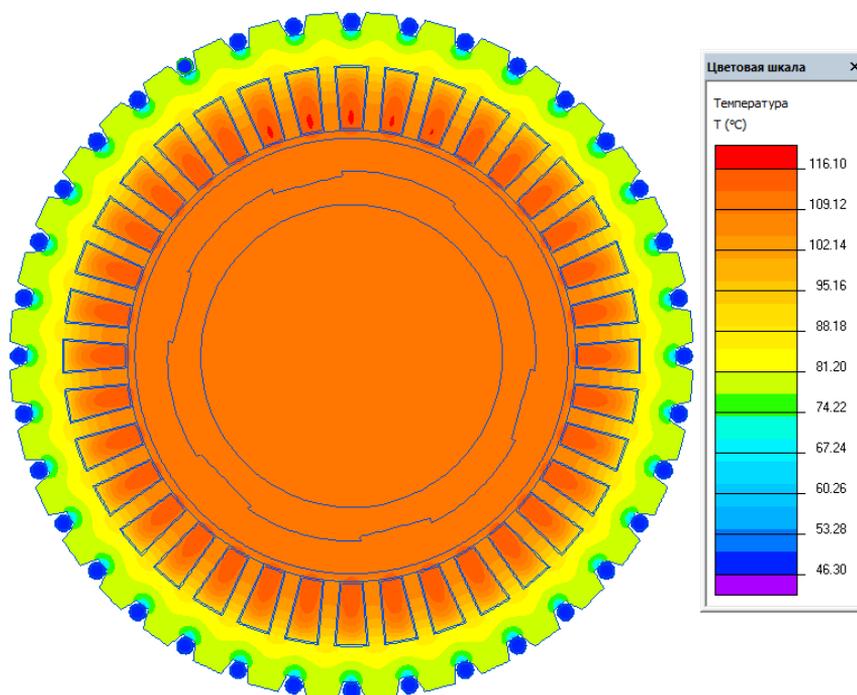


Рис. 3. Эпюра распределения температур активных частей генератора

Из расчетных данных потерь в меди и стали статора, приведенных в табл. 1, следует, что при работе ТЭГ без мультипликатора (1600 об./мин.) основные потери выделяются в обмотках статора. С учетом требований по степени защиты ТЭГ – IP65 отвод тепла, как показано на рис. 3, возможен только с массива статора внедрением трубок с хладагентом. Отвод тепла с меди обмоток затруднен из-за их большого теплового сопротивления с листовым массивом статора [3, 7].

При работе ТЭГ с мультипликатором происходит перераспределение потерь. В таком режиме работы потери в меди составляют 15–18% от потерь при работе без мультипликатора. Увеличенные потери в стали статора эффективнее отводятся хладагентом.

Согласно рекомендациям руководства по эксплуатации ДВС ЯМЗ следует обращать внимание на то, что установившаяся температура масла и контактных с ним корпусных деталей, включая коленвал, достигает 120°C, что для генератора, сопряженного собственным валом непосредственно с ДВС, является дополнительным фактором взаимного перегрева.

Соединение валов ТЭГ и ДВС через мультипликатор создает тепловой барьер и значительно снижает взаимное тепловое воздействие.

КПД мультипликации для малых значений передаточного числа варьируется в диапазоне 0,92–0,95.

Данные расчетов стартер-генераторов трех исполнений указывают на то, что магнитная система для оборотов ротора – 3000 об/мин имеет наибольшую сходимость к заданным техническим требованиям по эффективности, материалам и технологичности. Рис. 2 иллюстрирует близкие к тяговым электродвигателям [6] требования к электротехнической стали, в которой магнитная индукция находится в пределах 1,8 Тл; рис. 3 – наивысшую температуру обмоток порядка 120°C, что для выбранных исполнений составляет наименьшую величину.

Выводы. 1. Для заданных условий предварительный конструктивный и технологический анализ показал оптимальное решение по выбору генератора фронтального погрузчика с номинальной частотой вращения ротора – 3000 об./мин при использовании мультипликатора с коэффициентом передачи 1,87, в том числе как естественного теплового барьера между ДВС и генератором.

2. Питание ТЭГ в режиме стартера обеспечивается установленным массивом тяговых аккумуляторов фронтального погрузчика с располагаемым напряжением 60 В без дополнительных повышающих преобразователей. Двигательный режим может быть реализован по алгоритму управления вентильным двигателем с датчиками положения ротора, при этом коммутация обмоток осуществляется тремя силовыми модулями полумостов на основе IGBT-ключей, встроенные демпфирующие диоды которых образуют трехфазный двухполупериодный выпрямитель, который после старта ДВС переводит ТЭГ с блоком управления в источник выпрямленной ЭДС.

3. Совместная работа ТЭГ и массива тяговых аккумуляторов должна обеспечиваться оригинальным блоком управления в транспортном средстве [4].

4. Конструктивное исполнение деталей, узлов и сборок активных частей рассчитанного генератора фронтального погрузчика позволяет реализацию

ТЭГ на основе отечественных материалов и комплектующих с использованием универсального оборудования и нестандартной оснастки без привлечения уникальных технологий.

Литература

1. *Анучин А.С.* Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств: дис... д-ра техн. наук. М., 2018. 445 с.
2. *Вольдек А.И.*, Электрические машины. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
3. *Готтер Г.* Нагревание и охлаждение электрических машин: пер. с нем. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 264 с.
4. Пат. 217697 РФ, СПК Н02К 29/08, Н02К 11/30, Н02К 3/28, Н02К 1/2753 Тяговый электропривод фронтального погрузчика / Бакшаев В.А., Байков А.А., Сидоров М.Ю., Горшков Е.Е., Калинин А.Г. Заявитель и патентообладатель. Чуваш. гос. ун-т. №2022135419/07(076957); заявл. 28.12.2022; опубл. 12.04.2023, Бюл. № 11.
5. *Пузаков А.В.* Прогнозирование работоспособности генераторов транспортных средств: монография / Оренбургский гос. ун-т. Оренбург, 2019. 332 с.
6. Тяговый электродвигатель для шасси фронтального погрузчика / *М.Ю. Сидоров, А.Г. Калинин, В.А. Бакшаев и др.* // Вестник Чувашского университета. 2022. № 3. С. 95–102.
7. *Уонг Х.*, Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
8. *Шуйский В.П.*, Расчет электрических машин / сокр. пер. с нем. Б.А. Цветкова и И.З. Богуславского. Л.: Энергия, 1968. 731 с.
9. *Anuchin A., Lashkevich M., Aliamkin D., Gulyaeva M.* Self-sensing Control of a Synchronous Homopolar Machine Using Field Current Response from Phase-shifted PWM. In: 2019 IEEE 10th International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED). Turin, Italy, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/SLED.2019.8896294.
10. *Wrobel R., Mecerow B.* A Comprehensive Review of Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines. In: IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, vol. 35, no. 2, pp. 1054–1064. DOI: 10.1109/TEC.2020.2964942.

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

КАЛИНИН АЛЕКСЕЙ GERMAHOVИЧ – 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 (zaosespel@yandex.ru).

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

ГОРШКОВ ЕВГЕНИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – главный конструктор, АО «Специальное машиностроительное конструкторское бюро», Россия, Санкт-Петербург (gorshkov.e.e@gmail.com).

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

TRACTION ALTERNATOR FOR ELECTRIC DRIVE
OF FRONT LOADER CHASSIS

Key words: starter-generator, magnetic materials, efficiency of electric machines, liquid cooling.

For heavy construction equipment with a hybrid electric transmission, the power center of a group of traction electric drives can be formed by an electric generator and a renewable energy storage device (battery array) with the possibility of their joint operation to provide a surge of current in a group of traction electric drives. The battery array can be used to power a generator in a starter mode when starting a diesel internal combustion engine.

The purpose of the study is to substantiate the choice of the magnetic system of the power generator for the electric transmission and the possibility of a starter mode for an internal combustion engine drive. The study was carried out within the framework of a subsidized project to create mass production of a family of front loaders with a hybrid electric drive in Chuvashia.

Materials and research methods. The studies were carried out by the method of finite element analysis using the Russian software ELCUT (professional version and a set of reference books for domestic electrical and magnetic materials).

Results. The stage of analytical calculation of the active parts of a transmission electric generator for the preliminary design stage is presented. It was carried out for the following conditions: the use of Russian electrical and magnetic materials, the use of common industrial bearings and antifreeze, compatibility with existing technological equipment in the production of traction electric motors, engine mode for performing the starter function. The substantiation of the choice of the magnetic system based on the ratios of magnetic fluxes of different sizes of stator teeth is given. The article is illustrated with diagrams of magnetic and thermal fields for given operational characteristics and properties of a transmission electric generator.

Conclusions. For a given type of drive diesel engines installed on the front loaders, the highest efficiency indicators of the proposed generator magnetic system occur when using a multiplier. The power supply of the generator in the starter mode is provided by the installed array of traction batteries of the front loader without additional step-up converters.

References

1. Anuchin A.S. *Razrabotka tsifrovyykh sistem effektivnogo upravleniya komplektov tyagovogo elektrooborudovaniya gibridnykh elektricheskikh transportnykh sredstv: dis. ... doct. tekhn. nauk.* [Development of digital systems for effective control of sets of traction electrical equipment of hybrid electric vehicles. Doct. Diss.]. Moscow, 2018, 445 p.
2. Woldek A.I. *Elektricheskiye mashiny. Uchebnik dlya studentov vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy* [Electrical machines. Textbook for students of higher technical educational institutions]. Leningrad, Energy Publ., 1978, 832 p.
3. Gotter G. *Nagrevaniye i okhlazhdeniye elektricheskikh mashin* [Heating and cooling of electrical machines]. Moscow, Gosnengroizdat Publ., 1961, 264 p.
4. Bakshaev V.A., Baykov A.A., Sidorov M.Yu., Gorshkov E.E., Kalinin A.G. *Tyagovyy elektroprivod frontal'nogo pogruzchika* [Traction drive for front loader]. Patent RF, no. 217697, 2023.
5. Puzakov A.V. *Prognozirovaniye rabotosposobnosti generatorov transportnykh sredstv* [Forecasting the performance of vehicle generators]. Orenburg, 201, 332 p.
6. Sidorov M.Yu., Kalinin A.G., Bakshayev V.A., Gorshkov Ye.L., Gorshkov E.E. *Tyagovyy elektrodvigatel' dlya shassi frontal'nogo pogruzchika* [Traction motor from front loader chassis]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2022, no. 3, pp. 95–102.
7. Uong Kh. *Osnovnyye formuly i dannyye po teploobmenu dlya inzhenerov* [Basic formulas and data on heat transfer for engineers]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979, 216 p.
8. Shuyskiy V.P. *Raschet elektricheskikh mashin* [Calculation of electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1968, 731 p.
9. Anuchin A., Lashkevich M., Aliamkin D., Gulyaeva M. Self-sensing Control of a Synchronous Homopolar Machine Using Field Current Response from Phase-shifted PWM. In: 2019 IEEE 10th International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED). Turin, Italy, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/SLED.2019.8896294.
10. Wrobel R., Mecrow B. A Comprehensive Review of Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines. In: IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, vol. 35, no. 2, pp. 1054–1064. DOI: 10.1109/TEC.2020.2964942.

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 (zaosespel@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., Бахшаев В.А., Горшков Е.Л., Горшков Е.Е.* Трансмиссионный электрогенератор для питания привода шасси фронтального погрузчика // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 4. – С. 130–139. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-130-139.