



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 629.33; 621.3

С.Н. ПОДДУБКО, канд. техн. наук, доц.
генеральный директор¹
E-mail: info@oim.by

А.В. БЕЛЕВИЧ
заместитель генерального директора по высокоавтоматизированному электротранспорту¹
E-mail: belevich2005@yandex.by

М.В. КАЛИНИН
начальник отдела проектирования электромеханических компонентов НИЦ «Электромеханические и гибридные силовые установки мобильных машин»¹
E-mail: Kalininmikhail1986@yandex.by

П.Э. ШАБАНОВ
главный конструктор по автомобильной технике – начальник управления главного конструктора²
E-mail: office@maz.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «МАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 03.09.2024.

МОДЕЛЬНЫЙ РЯД УНИФИЦИРОВАННЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ КОММЕРЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Рассматривается создание модельного ряда унифицированных силовых электроприводов для коммерческого электротранспорта. Особенностью работы является реализация концепции снижения себестоимости изготовления электромеханических силовых установок (ЭМСУ) электромобилей путем унификации узлов и компонентов, входящих в ее состав. При формировании ряда унифицированных силовых электроприводов к компонентам предъявлялся комплекс конструктивных, компоновочных, технологических и экономических требований, обеспечивающих изготовление на их базе грузовых либо пассажирских электромобилей полной массой от 3,5 до 12 т, что соответствует категориям транспортных средств N1, N2, M2, M3. Разработанные основные компоненты унифицированных ЭМСУ включают: асинхронные трехфазные тяговые электрические моторы с диапазоном мощностей от 80 до 300 кВт, диапазоном крутящих моментов от 250 до 1000 Н·м соответственно, частотой вращения выходного вала 9000 мин⁻¹ и жидкостным охлаждением статора и ротора; инверторы, предназначенные для управления тяговыми электромоторами с диапазоном входных напряжений от 300 до 900 В, диапазоном выходных фазных токов от 200 до 600 А и жидкостным охлаждением силовых ключей; понижающие редукторы с передаточным отношением от 3 до 4,5 и ступенчатые коробки передач с количеством передач от 2 до 4. Результатом работ по унификации силовых электроприводов для коммерческого транспорта также является ряд типовых конструкций деталей и узлов и сборочных единиц; нормативно-техническое обеспечение контроля (испытаний, анализа, измерений) сертификации и оценки качества продукции; установление требований к технологическим процессам, в том числе для снижения материало-, энерго- и трудоёмкости для обеспечения применения малоотходных технологий. При создании электрогрузовика МАЗ-4381ЕЕ, соответствующего категории транспортного средства N2, была применена ЭМСУ в составе электродвигателя ТАЕМ 130 мощностью 130 кВт и двухступенчатой вальной коробки передач. Созданный образец электрического грузовика характеризуется практически полной лока-

лизацией, обеспечивающей импортнезависимость большинства компонентов и интеллектуальной составляющей авто.

Ключевые слова: электромобиль, трансмиссия, тяговый электромотор, силовой электропривод, типоразмерный ряд, вальная коробка передач, планетарная коробка передач

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-5-16>

Введение. Наиболее эффективным способом снижения стоимости и издержек производства и повышения качества изделий машиностроения является применение метода унификации составляющих их компонентов. Это относится и к силовым электрическим установкам. Ярким примером является модельный ряд трансмиссий концернов ZF (Германия), BorgWarner, Eaton (США) и других производителей [1–15]. На рисунке 1 приведен пример использования однотипного блока силовой электроники 1 (тягового инвертора) в одной и двухступенчатой ЭМСУ ZF Cetrax lite и ЭМСУ ZF Cetrax mid. Базовые компоненты ЭМСУ вклю-

чают тяговый электродвигатель, инвертор, редуктор, компоненты системы охлаждения электродвигателя и инвертора.

Практическая реализация создания модельного ряда ЭМСУ на основе унифицированных базовых компонентов для коммерческого электротранспорта различных типов и назначения требует разработки соответствующей научно-технической концепции. В открытой печати описания такой концепции не найдено. Поэтому работа посвящена изложению базовых подходов, входящих в основу концепции формирования модельного ряда унифицированных ЭМСУ для коммерческого электротранспорта.

Основы концепции формирования модельного ряда ЭМСУ на основе унифицированных базовых компонентов. Опираясь на ряд стандартов в сфере электротранспорта: Глобальные технические правила № 20, Правила ООН № 100, СТБ ISO 6469-1-2021, СТБ ISO 6469-2-2021, СТБ ISO 6469-3-2021, СТБ ISO 6469-4-2021, СТБ ISO 8714-2021, СТБ ISO 8715-2021, а также с учетом мирового опыта сформирован перечень базовых компонентов (таблица 1) для модельного ряда унифицированных ЭМСУ коммерческого электротранспорта отечественного производства. При этом учитывались перечисленные ниже особенности и требования к рассматриваемым компонентам и системам.

Важнейшей задачей является создание высокоэффективных ЭМСУ. Одним из направлений решения данной задачи видится использование высокооборотистых тяговых электродвигателей. На сегодняшний день коэффициент полезного действия ЭМСУ СТЭП200W как электромеханического преобразователя достигает 95 % на оборотах от 6000 до 9000 мин⁻¹. Не менее важным узлом ЭМСУ, обеспечивающим потребительские качества электромобиля в целом, является редукторный узел.

В наибольшей степени повышенное акустическое излучение зубчатых передач характерно для высокоскоростных передач, и данная характеристика в большинстве случаев также коррелирует с показателями надежности и долговечности зубчатых механизмов. Данное обстоятельство влечет за собой необходимость использования в составе редукторного узла косозубых зубчатых передач не ниже 6-го класса точности по ГОСТ 1643-81.

Исполнение ЭМСУ в составе единого модуля, включающего тяговый электродвигатель,

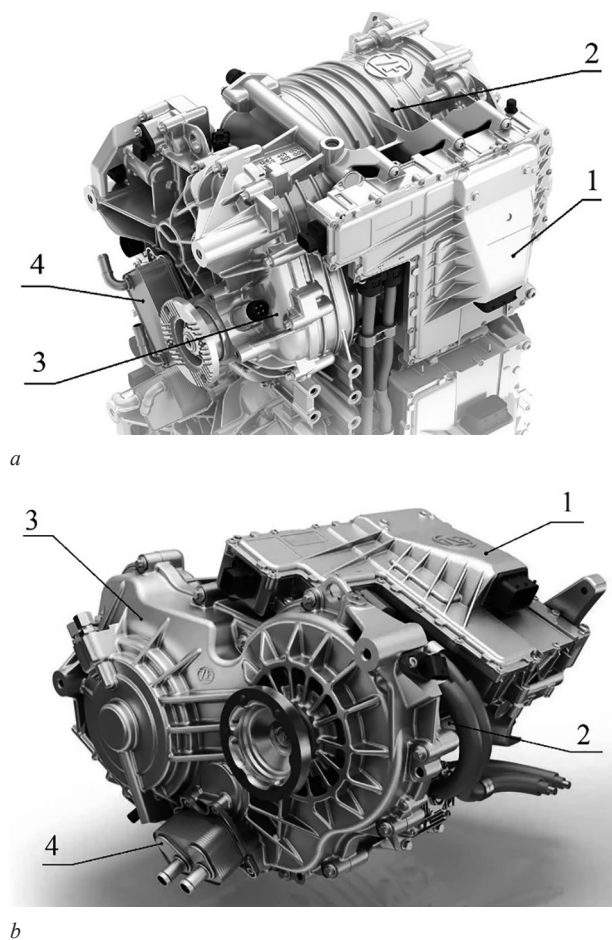
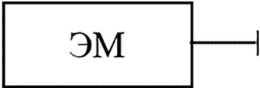
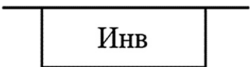
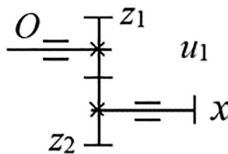
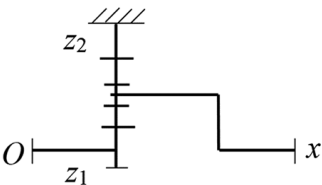
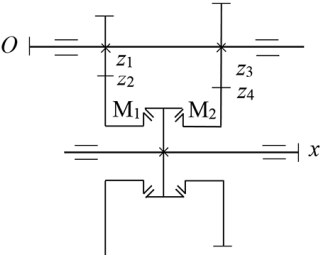
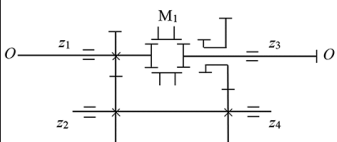
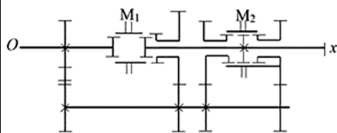


Рисунок 1 — Пример использования однотипного блока силовой электроники в различных ЭМСУ ZF: 1 — инвертор; 2 — тяговый электродвигатель; 3 — редукторный узел; 4 — теплообменник системы охлаждения электродвигателя и инвертора

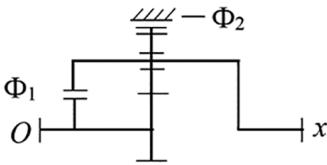
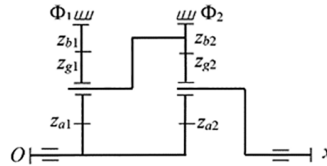
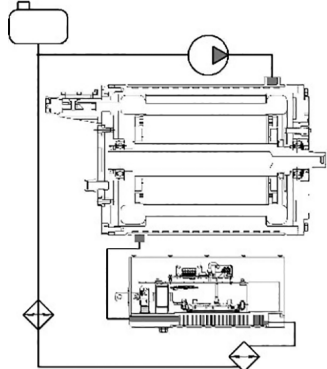
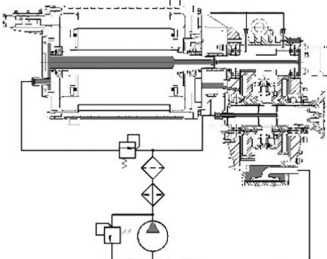
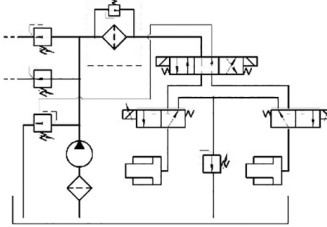
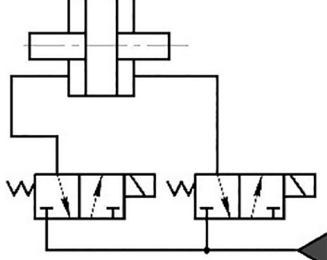
Figure 1 — Example of using the same type of power electronics unit in different ZF EMPUs: 1 — inverter; 2 — traction motor; 3 — gear unit; 4 — heat exchanger of electric motor and inverter cooling system

Таблица 1 — Перечень базовых унифицированных компонентов ЭМСУ для коммерческого электротранспорта различных типов и назначения

Table 1 — List of basic unified EMPU components for commercial electric vehicles of different types and purposes

№ п/п	Наименование компонента	Разработчик / производитель	Схематическое обозначение	Основные характеристики
1	Тяговый электромотор (ЭМ)	Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси / ОАО «Могилев-лифтмаш»		тип электромотора — асинхронный; номинальная мощность — 130 кВт; крутящий момент — 460 Н·м; охлаждение статора и ротора — жидкостное; масса — 230 кг
2	Инвертор управления ЭМ (Инв.)	Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси / ОАО «Измеритель»		напряжение питания — 700 В; коммутлируемый ток — 600 А; охлаждение силовых ключей — жидкостное; масса — 20 кг
3	Одноступенчатый согласующий вальный несоосный редуктор (ВСР)	Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси / ОАО «МЗШ»		тип зубчатой передачи — косозубая, внешнего зацепления; передаточное отношение — 2,74; масса — 42 кг
4	Одноступенчатый согласующий планетарный соосный редуктор (ПСР- 1/1)	Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси / ОАО «МЗКТ»		тип зубчатой передачи — косозубая, планетарная; передаточное отношение — 3,6; количество сателлитов — 3; масса — 48 кг
5	Двухступенчатая вальная несоосная КП (ВКП-2/2)			тип зубчатой передачи — косозубая, внешнего зацепления; передаточное отношение первой передачи — 5,1; передаточное отношение второй передачи — 3,2; муфта включения — синхронизирующая; масса — 79 кг
6	Двухступенчатая вальная соосная КП 2Е110-АТ	Fast Gear (КНР)		тип зубчатой передачи — косозубая, внешнего зацепления, трехпоточная; передаточное отношение первой передачи — 2,77; передаточное отношение второй передачи — 1; муфта включения — зубчатая несинхронизирующая; масса — 52 кг;
7	Четырехступенчатая вальная соосная КП 4Е120-АТ			тип зубчатой передачи — косозубая, внешнего зацепления, двухпоточная; передаточное отношение первой передачи — 5,2; передаточное отношение второй передачи — 3,6; передаточное отношение третьей передачи — 1,9; передаточное отношение четвертой передачи — 1; муфта включения — зубчатая несинхронизирующая; масса — 86 кг

Продолжение таблицы 1
Continuation of the Table 1

8	Двухступенчатая планетарная однорядная соосная КП (ПКП-1/2)	Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси / ОАО «МЗКТ»		тип зубчатой передачи — косозубая, планетарная; передаточное отношение первой передачи — 3,6; передаточное отношение второй передачи — 1; количество сателлитов — 3; масса — 60 кг
9	Двухступенчатая планетарная двухрядная соосная КП (ПКП-2/2)			тип зубчатой передачи — косозубая, планетарная; передаточное отношение первой передачи — 6,6; передаточное отношение второй передачи — 3,2; количество сателлитов — 4; масса — 110 кг;
10	Система охлаждения статора тягового ЭМ и инвертора	Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси		тип — жидкостная, замкнутая, принудительная; состав: радиатор, теплообменник, электронасос, бачок расширительный, патрубки
11	Гидросистема смазки редукторных узлов и охлаждения ротора ЭМ			тип — открытая, принудительная; состав: электронасос, регулятор давления, фильтр, теплообменник, трубопроводы
12	Комбинированная гидросистема смазки и управления фрикционными ПКП			тип — комбинированная; состав: блок управления, масляный электронасос, регуляторы давления, фильтр, теплообменник, трубопроводы
13	Система управления переключением передач КП			тип — пневматическая; состав: блок управления, пневмоцилиндры, электропневмоклапны, трубопроводы

инвертор, редукторный узел и систему охлаждения, имеет ряд преимуществ по сравнению со схемой разобщенной установки узлов на шасси электромобиля:

- уменьшение протяженности и более высокая степень экранирования силовых и информационных проводников, соединяющих между собой узлы ЭМСУ;

- объединение систем охлаждения статора электродвигателя и инвертора, системы смазки редукторного узла и ротора электродвигателя без дополнительной гидравлической арматуры;
- удобство демонтажа ЭМСУ для проведения ремонтных работ.

Набор требований, предъявляемых к силовым установкам электротранспорта, будет различным в зависимости от области его применения. Для городского электрического транспорта характерны средние скорости движения от 12 до 25 км/ч, а также непродолжительная остановка в конце маршрута, которая может быть использована для пополнения заряда тяговых батарей. В связи с этим ЭМСУ может иметь редуктор с фиксированным передаточным отношением, находящимся в диапазоне от 3 до 4,5 и обеспечивающим заданный скоростной диапазон.

Для электрического транспорта, осуществляющего движение по пригородным трассам, характерны повышенные скорости и увеличенные отрезки пути между зарядными станциями. Это влечет за собой использование ЭМСУ с большим количеством ступеней. Для электрогрузовика полной массой 12 тонн предпочтительно использование двухступенчатой КП с передаточными отношениями 5,1 и 3,2 на 1-й и 2-й передаче соответственно.

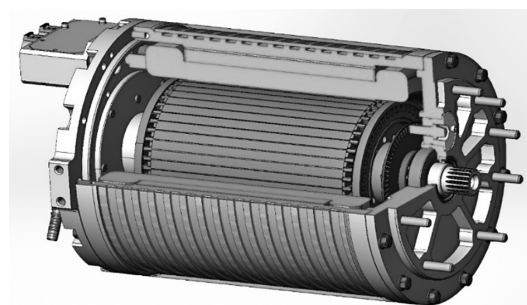
Практическая реализация модельного ряда ЭМСУ на основе унифицированных базовых компонентов. В качестве первого коммерческого электромобиля, разработанного и изготовленного с использованием унифицированных компонентов ЭМСУ, созданных с учетом требований сформированной концепции, стал грузовой автомобиль МАЗ 4381 категории N2 производства ОАО «МАЗ». С этой целью был разработан и изготовлен комплект базовых компонентов ЭМСУ на номинальную мощность 130 кВт.

Модельный ряд унифицированных компонентов ЭМСУ номинальной мощностью 130 кВт отечественного производства позволяет создавать коммерческий электротранспорт категорий N1, N2, M2, M3. Описание разработанных конструкций и основных параметров базовых компонентов ЭМСУ приведены ниже (нумерация компонентов соответствует таблице 1).

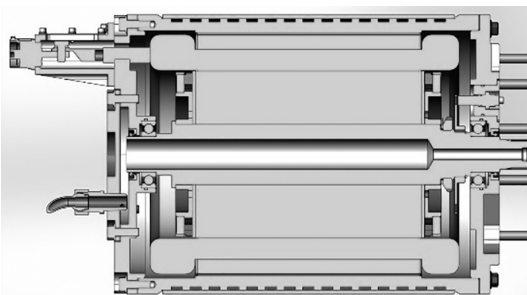
1. Тяговый электродвигатель (ЭМ) ТАЕМ 130.

Внешний вид и разрез ЭМ приведены на рисунке 2. Характеристики:

- переменного тока, трехфазный, асинхронный;
- охлаждение — жидкостное, двухконтурное;
- мощность номинальная — 130 кВт;
- крутящий момент номинальный — 460 Н·м;
- напряжение питания — 640–700 В;
- частота вращения ротора максимальная — 9000 мин⁻¹;
- габариты — $D = 0,35$ м, $L = 0,5$ м;
- масса — 230 кг;



a

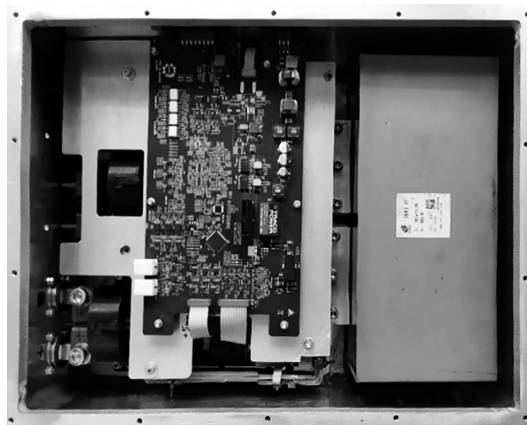


b

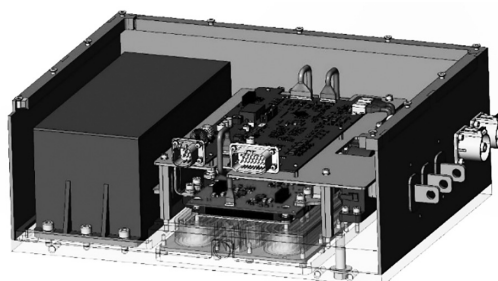
Рисунок 2 — Внешний вид (a) и разрез (b) тягового ЭМ ТАЕМ 130
Figure 2 — External view (a) and section (b) of traction motor TAEM 130

- разработчик — Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси;
- производитель — ОАО «Могилевлифтмаш».

2. Инвертор управления (Инв). Вид сверху и компьютерная модель — на рисунке 3. Предназ-



a



b

Рисунок 3 — Вид сверху (a) и компьютерная модель (b) инвертора управления тягового ЭМ
Figure 3 — Top view (a) and computer model (b) of the traction motor control inverter

начен для управления тяговым ЭМ за счет формирования его заданной электромеханической характеристики. Преобразует на основе разработанных алгоритмов и программного обеспечения постоянный ток тяговой аккумуляторной батареи (АКБ) в переменный трехфазный ток с изменяемыми частотой и напряжением для питания ЭМ.

Характеристики:

- система охлаждения — жидкостная;
- мощность номинальная — 130 кВт;
- входное напряжение — 100–900 В;
- номинальный ток — 600 А;
- габариты — 300×400×180 мм;
- масса — 20 кг;
- производитель — ОАО «Измеритель».

3. Одноступенчатый вальный согласующий редуктор несоосный (ВСП-1/1). Внешний вид и разрез — на рисунке 4. Предназначен для согласования параметров тягового ЭМ с аналогичными параметрами шасси автотранспортного средства (АТС).

Характеристики:

- частота вращения входного вала — до 9000 мин⁻¹;
- передаточное отношение — 2,74;
- масса — 42 кг;
- производитель — ОАО «МЗШ».

5. Двухступенчатая вальная коробка передач несоосная (ВКП-2/2). Внешний вид и разрез — на рисунке 5. Переключение передач — синхронизированными зубчатыми муфтами. Предназначена для использования в комплекте с тяговым ЭМ ТАЕМ 130 для обеспечения необходимого тягового усилия и максимальной скорости движения АТС.

Характеристики:

- передаточные числа — 3,2; 5,1;
- управление переключением передач — сжатым воздухом;
- смазка — принудительная;
- масса — 79 кг;
- производитель — ОАО «МЗКТ».

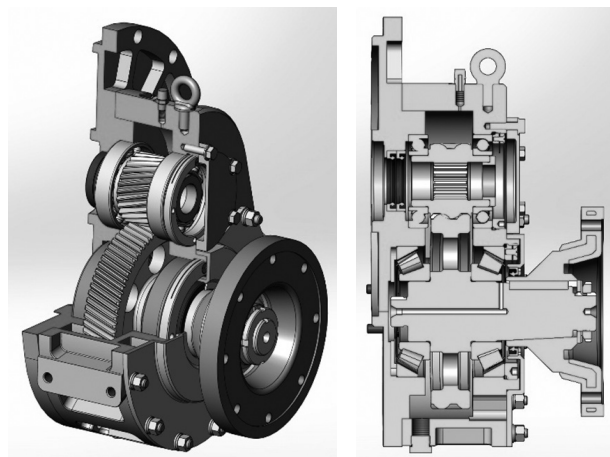


Рисунок 4 — Внешний вид (а) и разрез (б) редуктора ВСП-1/1
Figure 4 — External view (a) and section (b) of the reducer VSR-1/1

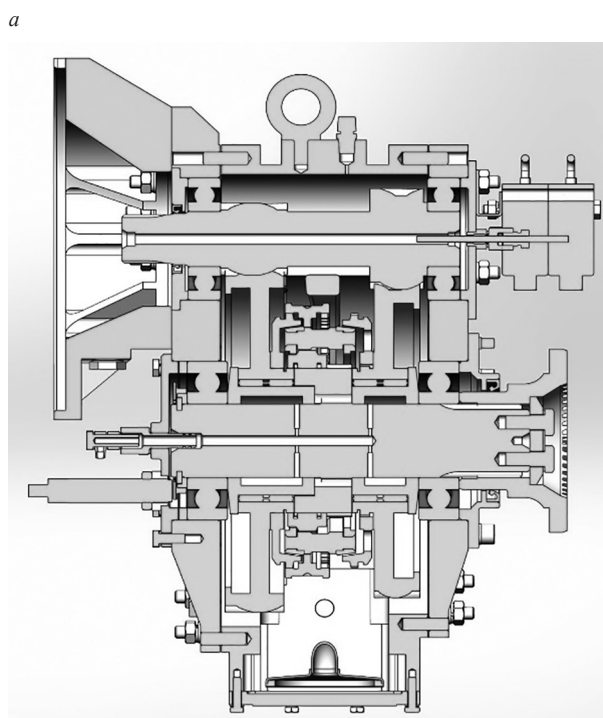
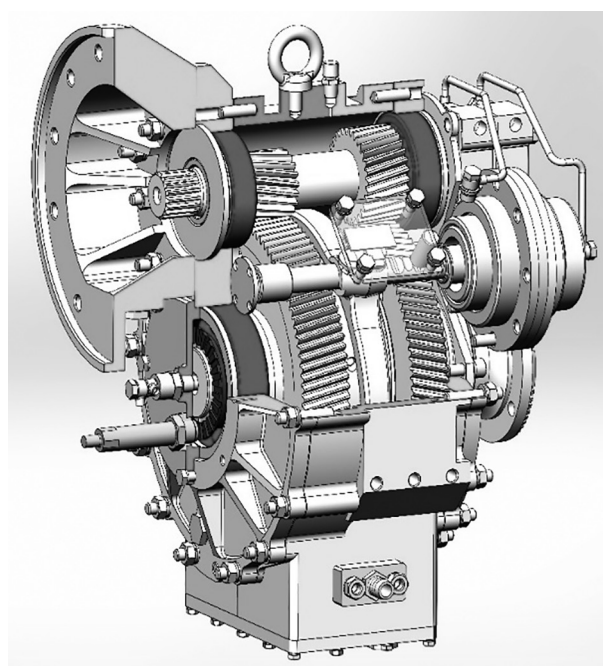
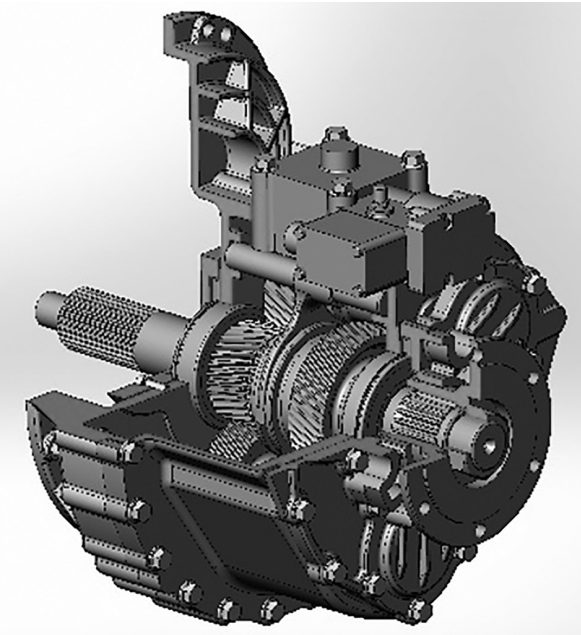


Рисунок 5 — Внешний вид (а) и разрез (б) ВКП-2/2
Figure 5 — External view (a) and section (b) of the VKP-2/2

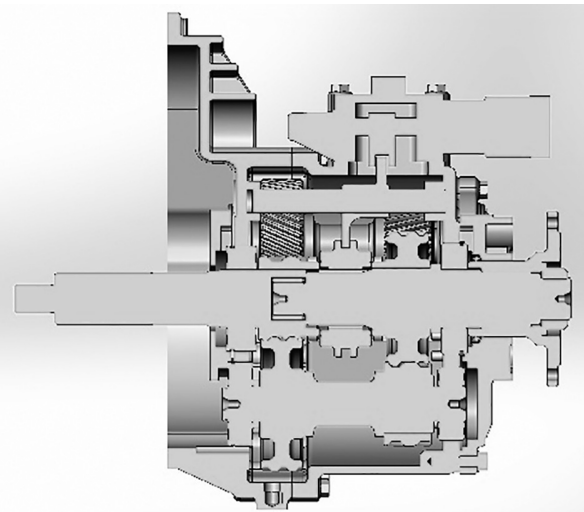
6. Двухступенчатая вальная коробка передач соосная КП 2Е110-АТ. Внешний вид и разрез — на рисунке 6. Используется в комплекте с тяговым ЭМ ТАЕМ 130 и ВСП-1/1 для обеспечения необходимого тягового усилия и максимальной скорости движения АТС.

Характеристики:

- передаточные числа — 2,77; 1,0;
- переключение передач — сжатым воздухом;
- масса — 52 кг;
- производитель — Fast Gear (КНР).



a



b

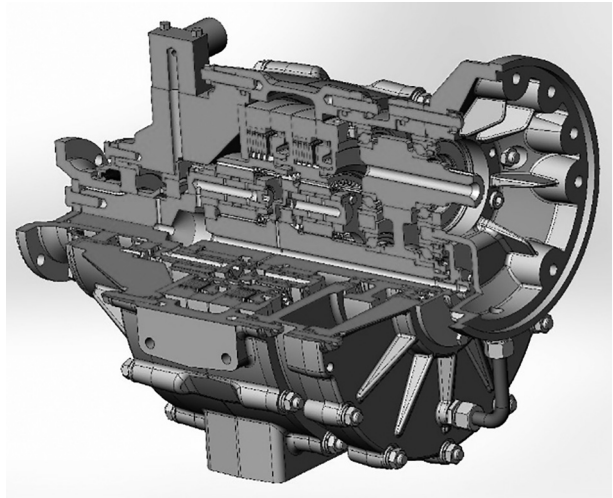
Рисунок 6 — Внешний вид (a) и разрез (b) двухступенчатой КП 2E110-AT Fast Gear (КНР)
Figure 6 — External view (a) and section (b) of 2E110-AT Fast Gear two-stage gearbox (PRC)

9. Двухступенчатая планетарная коробка передач двухрядная соосная (ПКП-2/2). Внешний вид и разрез — на рисунке 7. Переключение передач — многодисковыми гидрорегулируемыми фрикционами без разрыва потока мощности. Используется в комплекте с тяговым ЭМ ТАЕМ 130 и ВСП-1/1.

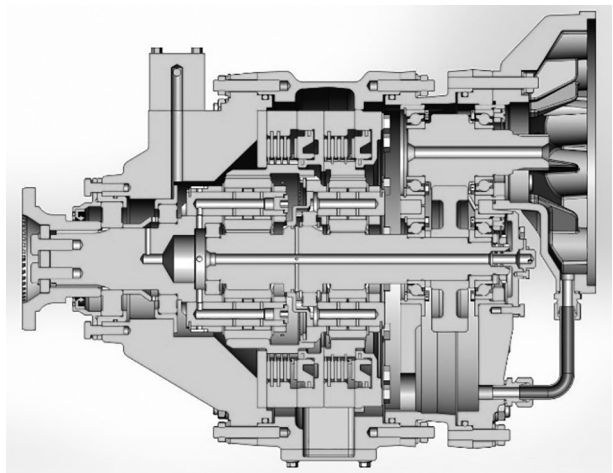
Характеристики:

- передаточные числа — 3,2; 6,6;
- оснащена комбинированной гидросистемой смазки и управления фрикционами;
- масса — 130 кг;
- потенциальный производитель — ОАО «МЗКТ».

Все разработанные ЭМСУ оснащаются системами жизнеобеспечения, осуществляющими смазку, охлаждение и управление силовой уста-



a



b

Рисунок 7 — Внешний вид (a) и разрез (b) ПКП-2/2
Figure 7 — External view (a) and section (b) of the PKP-2/2

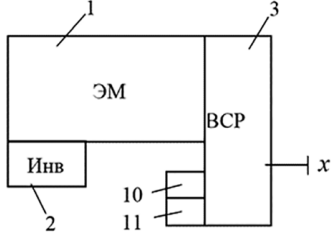
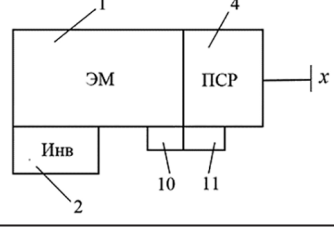
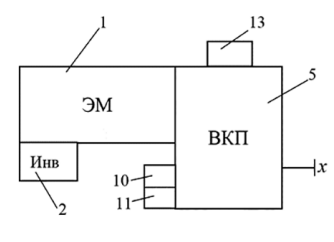
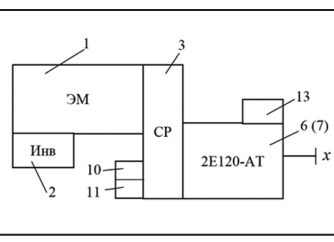
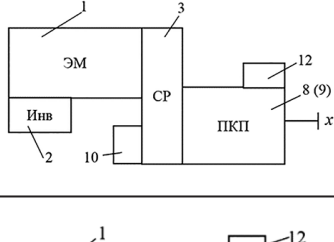
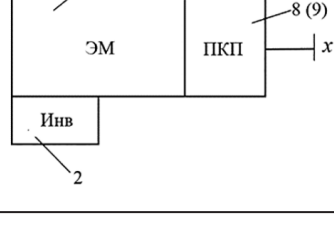
новкой, и включающими подсистемы № 10–13 в таблице 1.

Построение модельного ряда ЭМСУ для коммерческого электротранспорта на основе унифицированных базовых компонентов. Принцип формирования структурного модельного ряда ЭМСУ на основе унифицированных базовых компонентов позволяет реализовать варианты структур ЭМСУ, удовлетворяющие широкому спектру требований, предъявляемых к электрическому транспорту. Разработанные с учетом таких требований комбинации унифицированных базовых компонентов, формирующих структурный модельный ряд ЭМСУ, приведены в таблице 2.

Основные характеристики предлагаемых структурных вариантов ЭМСУ для коммерческого электротранспорта следующие.

Структура № 1 наиболее проста по конструкции и имеет минимальную стоимость. Однако тяговые и скоростные ее возможности ограничены аналогичными характеристиками тягового ЭМ. Такой электропривод подходит для городского бюджетного пассажирского электротранспорта

Таблица 2 — Сформированный структурный модельный ряд ЭМСУ на основе унифицированных базовых компонентов для коммерческого электротранспорта различных типов и назначения
 Table 2 — Formed structural model range of EMPU on the basis of unified basic components for commercial electric transport of various types and purposes

№ п/п	Структура ЭМСУ	Состав: № компонентов согласно таблице 1	Назначение	Основные характеристики
1		1, 2, 3, 10, 11	Городской электротранспорт категорий М2, М3 (электробусы, троллейбусы) с максимальной скоростью движения до 70 км/ч. Несоосный вариант	тип электромотора — асинхронный; номинальная мощность — 130 кВт; крутящий момент — 460 Н·м; передаточное отношение — 2,74; масса — 312 кг
2		1, 2, 4, 10, 11	Соосный вариант	тип электромотора — асинхронный; номинальная мощность — 130 кВт; крутящий момент — 460 Н·м; передаточное отношение — 3,6; масса — 322 кг
3		1, 2, 5, 10, 11, 13	Электрогрузовики и электробусы всех категорий с максимальной скоростью движения до 110 км/ч.	тип электромотора — асинхронный; номинальная мощность — 130 кВт; крутящий момент — 460 Н·м; передаточное отношение первой передачи — 5,1; передаточное отношение второй передачи — 3,2; масса — 342 кг
4		1, 2, 3, 6 (7), 10, 11, 13	Несоосный вариант	тип электромотора — асинхронный; номинальная мощность — 130 кВт; крутящий момент — 460 Н·м; передаточное отношение первой передачи — 7,34; передаточное отношение второй передачи — 2,74; масса — 326 кг
5		1, 2, 3, 8 (9), 10, 12	Электрогрузовики категорий (N2, N3) для тяжелых условий эксплуатации (переключение передач без разрыва потока мощности). Несоосный вариант	тип электромотора — асинхронный; номинальная мощность — 130 кВт; крутящий момент — 460 Н·м; передаточное отношение первой передачи — 18; передаточное отношение второй передачи — 8,77; масса — 412 кг
6		1, 2, 8 (9), 12	Электрогрузовики категорий (N2, N3) для тяжелых условий эксплуатации (переключение передач без разрыва потока мощности). Соосный вариант	тип электромотора — асинхронный; номинальная мощность — 130 кВт; крутящий момент — 460 Н·м; передаточное отношение первой передачи — 6,6; передаточное отношение второй передачи — 3,2; масса — 348 кг.

категорий М2, М3 — электробусов и троллейбусов, скорость движения которых не превышает 65 км/ч. ЭМСУ имеет тяговый ЭМ и одноступен-

чатый вальный несоосный согласующий редуктор, наиболее простой по конструкции и невысокой стоимости.

Структура № 2 по характеристикам аналогична структуре № 1, но имеет планетарный однорядный соосный согласующий редуктор, более компактный, но требующий в производстве высокотехнологичного оборудования.

Структуры № 3 и 4 образованы высокоскоростными тяговыми ЭМ и многоступенчатыми вальными КП. Обеспечивают широкий диапазон тяговых и скоростных характеристик при высокой энергоэффективности за счет работы ЭМ в зоне высоких КПД. Переключение передач осуществляется с помощью пневмоуправляемых зубчатых муфт. Увеличение числа передач КП повышает общий КПД привода, но усложняет (удорожает) конструкцию КП. Обеспечивают приемлемые габариты, массу и стоимость ЭМСУ. Недостатки: кратковременный разрыв потока мощности при переключении передач КП, высокие требования к качеству работы системы управления.

Структура № 5 образована высокоскоростными тяговыми ЭМ, одноступенчатым согласующим редуктором и ступенчатыми планетарными КП (ПКП), переключение передач которыми осуществляется многодисковыми гидроуправляемыми фрикционными под нагрузкой без разрыва потока мощности. Используется на АТС, работающих в тяжелых дорожных условиях.

Структура № 6 аналогична структуре № 5, но не имеет понижающего редуктора, а на входе в ПКП реализуется весь скоростной диапазон тягового ЭМ, что предъявляет высокие требования к качеству изготовления и сборки. Конструкция ЭМСУ компактна и высокоэффективна.

Создание опытных образцов высокоэффективных ЭМСУ для коммерческого электротранспорта на основе унифицированных базовых компонентов. На основе созданных унифицированных компонентов номинальной мощностью 130 кВт разработаны конструкции высокоэффективных ЭМСУ для коммерческого электротранспорта.

На рисунках 8–11 приведены продольные разрезы ЭМСУ на номинальную мощность 130 кВт, сформированные из разработанных базовых компонентов — тяговых высокоскоростных ЭМ, инверторов, редукторных узлов или коробок передач

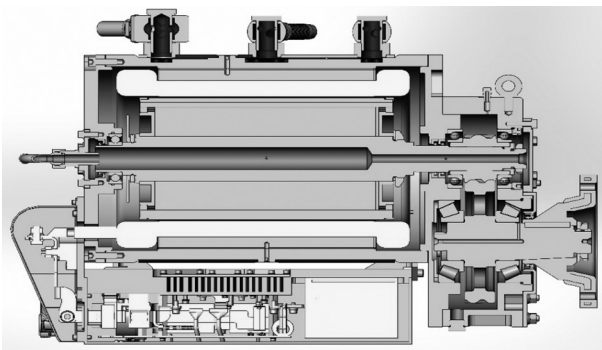


Рисунок 8 — Продольный разрез ЭМСУ по структуре № 1
Figure 8 — Longitudinal section of EMPU on structure No. 1

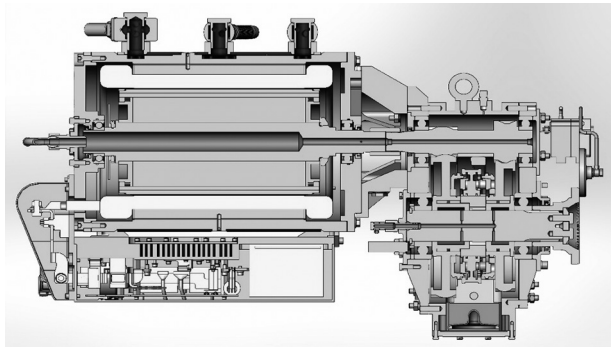


Рисунок 9 — Продольный разрез ЭМСУ по структуре № 3
Figure 9 — Longitudinal section of EMPU on structure No. 3

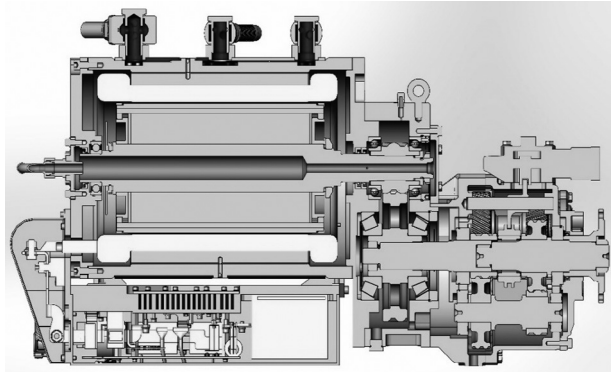


Рисунок 10 — Продольный разрез ЭМСУ по структуре № 4
Figure 10 — Longitudinal section of EMPU on structure No. 4

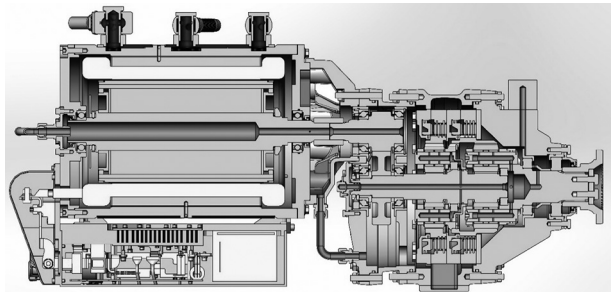


Рисунок 11 — Продольный разрез ЭМСУ по структуре № 5
Figure 11 — Longitudinal section of EMPU on structure No. 5

и систем жизнеобеспечения согласно вариантам структурных решений унифицированного модельного ряда ЭМСУ, описанных в таблице 2.

При создании экспериментального образца коммерческого электрогрузовика МАЗ 4381ЕЕ использована ЭМСУ разработки Объединенного института машиностроения НАН Беларуси по структуре № 3 (см. таблицу 1) как наиболее подходящая для этих целей по компоновочным требованиям и экономической целесообразности с возможностью изготовления на предприятиях Министерства промышленности Республики Беларусь. Продольный разрез ЭМСУ приведен на рисунке 9. В качестве альтернативного варианта рассматривается структура № 4 с использованием недорогих КП 2E110-AT производства Fast Gear (КНР). Продольный разрез данной ЭМСУ приведен на рисунке 10.

ЭМСУ МАЗ 4381ЕЕ оснащена системой жизнеобеспечения, принципиальная схема которой

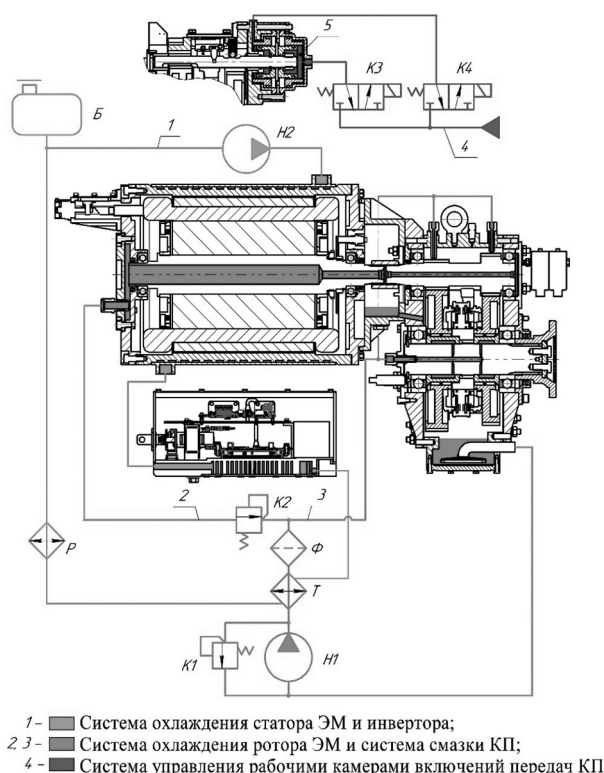


Рисунок 12 — Принципиальная схема комбинированной системы жизнеобеспечения ЭМСУ электрогрузовика МАЗ 4381ЕЕ: Н1 — масляный электронасос; К1, К2 — регуляторы давления; Т — теплообменник; Ф — масляный фильтр; Н2 — водяной электронасос; Р — радиатор; Б — бак расширительный; К3, К4 — электропневмоклапаны; 1 — система охлаждения статора ЭМ и инвертора; 2 — система охлаждения ротора ЭМ; 3 — система смазки КП; 4 — магистраль сжатого воздуха АТС; 5 — рабочие камеры включений передач КП

Figure 12 — Schematic diagram of the combined life support system of the electric truck MAZ 4381EE EMPU: H1 — oil electric pump; K1, K2 — pressure regulators; T — heat exchanger; Ф — oil filter; H2 — water electric pump; P — radiator; Б — expansion tank; K3, K4 — electropneumo valves; 1 — cooling system of electric motor stator and inverter; 2 — cooling system of electric motor rotor; 3 — gearbox lubrication system; 4 — vehicle compressed air main; 5 — gearbox gear engagement chambers

приведена на рисунке 12. Система комбинированная, включает подсистемы (см. таблицу 1, позиции №№ 10, 11, 13) охлаждения статора ЭМ и инвертора (см. рисунок 12, позиция 1), системы охлаждения ротора ЭМ и смазки КП (см. рисунок 12, позиция 2) и пневмосистему управления КП (см. рисунок 12, позиция 3).

Выводы. Наиболее экономически эффективным способом снижения стоимости и издержек производства и повышения качества ЭМСУ является применение метода унификации составляющих их базовых компонентов.

Предложены основы концепции формирования модельного ряда ЭМСУ на основе унифицированных базовых компонентов, включающие технические требования к базовым компонентам, позволившие разработать структуру модельного ряда высокоэффективных ЭМСУ для коммерческого электротранспорта различного типа и назначения.

Для городского электротранспорта, скорость которого менее 65 км/ч, рекомендуется ЭМСУ

со структурой № 1 (см. таблицу 2). Для электротранспорта, используемого на загородных маршрутах, максимальная скорость которых превышает 100 км/ч, рекомендовано использовать структуры ЭМСУ №№ 2–4. Для электрогрузовиков, работающих в тяжелых дорожных условиях, рекомендуется применять ЭМСУ со структурами №№ 5 и 6, в которых используются коробки переключения передач с изменением передач в ходе движения без разрыва потока мощности.

ЭМСУ коммерческого электротранспорта оснащаются стандартизованными системами жизнеобеспечения (см. таблицу 2, позиции 10–12), осуществляющими охлаждение, смазку и управление ЭМСУ.

По результатам исследований разработаны конструкции, реализовано изготовление унифицированных базовых компонентов и экспериментальная апробация конструкции ЭМСУ на номинальную мощность 130 кВт для экспериментального образца электрогрузовика МАЗ 4381ЕЕ категории N2.

Список литературы

- Two-speed gearbox dynamic simulation predictions and test validation // NTRS. — URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100024378> (date of access: 28.07.2024).
- Electric vehicle architectures // Edisciplinas. — URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3514256/mod_folder/content/0/Electric%20Vehicle%20Architecture.pdf (date of access: 03.08.2024).
- BorgWarner launches its first integrated electric drive module for the EV market // Green Car Congress. — URL: <https://www.greencarcongress.com/2016/11/20161116-edm.html> (date of access: 16.08.2024).
- Xtrac introduces integrated lightweight electric vehicle (ILEV) transmission system; torque vectoring with dual motors // Green Car Congress. — URL: <https://www.greencarcongress.com/2016/07/20160713-xtrac.html> (date of access: 22.08.2024).
- Two-speed transmission for EVs could make a comeback // GREEN CAR REPORTS. — URL: <https://clck.ru/3EXfSy> (date of access: 27.08.2024).
- Battery company Kreisel Electric introduces automated 2-speed transmission for EVs // Green Car Congress. — URL: <https://www.greencarcongress.com/2018/09/20180906-kreisel.html> (date of access: 08.09.2024).
- Performance evaluation criteria for the analysis of class-4 electric truck / A. Morozov, K. Humphries, T. Zou, J. Angeles // CSME International Congress. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/305398171> (date of access: 15.08.2024).
- Multi-Speed transmission for commercial delivery medium duty plug-in electric drive vehicles // Eaton Corporation. — URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f33/vs161_chavdar_2016_o_web.pdf (date of access: 03.09.2024).
- Gear ratio optimization of a multi-speed transmission for electric dump truck operating on the structure route / S. Tan, J. Yang, X. Zhao [et al.] // Energies. — 2018. — Vol. 11, iss. 6. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en11061324>.
- CeTrax — electric central drive // ZF. — URL: https://www.zf.com/products/en/special_vehicles/products_64419.html (date of access: 01.09.2024).
- Богданов, К.Л. Тяговый электропривод автомобиля: учеб. пособие для спец. 1609 / К.Л. Богданов, под ред. С.П. Банникова. — М.: МАДИ, 2009. — 57 с.
- Effect of transmission design on electric vehicles (EV) performance / Q. Ren; D.A. Crolla; A. Morris // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, 7–10 September 2009. — 2009. — P. 1260–1265. — DOI: 10.1109/VPPC.2009.5289707.

13. Electrically scalable axial-module // ESKAM. — URL: http://www.a3ps.at/site/sites/default/files/Workshop_Lightweight/Wolfgang%20Pflug_Projekt%20ESKAM.pdf (date of access: 01.03.2024).
14. UNDP pilots electric trucks for waste collection in central Vietnam // Tuoi Tre News. — URL: <https://tuoitrenews.vn/news/society/20230518/undp-pilots-electric-trucks-for-waste-collection-in-central-vietnam/73193.html> (date of access: 29.08.2024).
15. Status of vehicle standards in Europe and North America // ICCT. — URL: <https://www.theicct.org/wp-content/uploads/2024/06/TTDS24-Policy-Brief-WEB-A4-65008-v5.pdf> (date of access: 04.03.2024).

PODDUBKO Sergey N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Director General¹

E-mail: info@oim.by

BELEVICH Alexander V.

Deputy Director General for Highly Automated Electric Transport¹

E-mail: belevich2005@yandex.by

KALININ Mikhail V.

Head of the Electromechanical Components Design Department of the R&D Center “Electromechanical and Hybrid Power Units of Mobile Machines”¹

E-mail: Kalininmikhail1986@yandex.by

SHABANAU Pavel E.

Chief Designer for Automotive Machinery – Head of the Chief Designer’s Department²

E-mail: office@maz.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²JSC “Minsk Automobile Plant” — Managing Company of “BELAVTOMAZ” Holding, Minsk, Republic of Belarus

Received September 3, 2024.

MODEL RANGE OF UNIFIED POWER DRIVES FOR COMMERCIAL ELECTRIC TRANSPORT

The article considers the creation of a model range of unified electric power drives for commercial electric vehicles. The peculiarity of the work is the realization of the concept of reducing the cost of production of electromechanical power units (EMPU) of electric vehicles by unification of units and components included in its composition. When forming a number of unified electric power drives, the components were subjected to a set of design, layout, technological and economic requirements ensuring the production on their basis of cargo or passenger electric vehicles with gross weight from 3.5 to 12 t, which corresponds to vehicle categories N1, N2, M2, M3. The developed main components of the unified EMPU include: asynchronous three-phase traction electric motors with power range from 80 to 300 kW, torque range from 250 to 1,000 N·m respectively, output shaft rotation frequency of 9,000 rpm and liquid cooling of stator and rotor; inverters designed to control traction motors with input voltage range from 300 to 900 V, output phase current range from 200 to 600 A and liquid-cooled power keys; reduction gearboxes with gear ratio from 3 to 4.5 and step gearboxes with the number of gears from 2 to 4. The result of works on unification of electric power drives for commercial transport also is a number of standard designs of parts and units and assembly units; normative and technical support of control (tests, analysis, measurements) of certification and quality assessment of products; establishment of requirements for technological processes, including for reduction of material, energy and labor intensity to ensure the use of low-waste technologies. When creating the electric truck MAZ-4381EE, corresponding to the vehicle category N2, the EMPU was used as a part of electric motor TAEM 130 with capacity of 130 kW and two-stage shaft gearbox. The created prototype of electric truck is characterized by almost complete localization, providing import independence of most components and intellectual component of the car.

Keywords: *electric vehicle, transmission, traction electric motor, electric power drive, standard range, shaft gearbox, planetary gearbox*

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-5-16>

References

1. *Two-speed gearbox dynamic simulation predictions and test validation*. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100024378> (accessed July 28, 2024).
2. *Electric vehicle architectures*. Available at: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3514256/mod_folder/content/0/Electric%20Vehicle%20Architecture.pdf (accessed August 3, 2024).
3. *BorgWarner launches its first integrated electric drive module for the EV market*. 2016. Available at: <https://www.greencarcongress.com/2016/11/20161116-edm.html> (accessed August 16, 2024).
4. *Xirac introduces Integrated Lightweight Electric Vehicle (ILEV) transmission system; torque vectoring with dual motors*. 2016. Available at: <https://www.greencarcongress.com/2016/07/20160713-xtrac.html> (accessed August 22, 2024).
5. Everts E.C. *Two-speed transmission for EVs could make a comeback*. 2019. Available at: <https://clck.ru/3EXfSy> (accessed August 27, 2024).
6. *Battery company Kreisel Electric introduces automated 2-speed transmission for EVs*. 2018. Available at: <https://www.greencarcongress.com/2018/09/20180906-kreisel.html> (accessed September 8, 2024).
7. Morozov A., Humphries K., Zou T., Angeles J. Performance evaluation criteria for the analysis of class-4 electric truck. *Proc. CSME international congress*, 2016. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/305398171> (accessed August 15, 2024).
8. Chavdar B. *Multi-speed transmission for commercial delivery medium duty plug-in electric drive vehicles*. Available at: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f33/vs161_chavdar_2016_o_web.pdf (accessed September 3, 2024).
9. Tan S., Yang J., Zhao X., Hai T., Zhang W. Gear ratio optimization of a multi-speed transmission for electric dump truck operating on the structure route. *Energies*, 2018, vol. 11, iss. 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11061324>.
10. *CeTrax — electric central drive*. Available at: https://www.zf.com/products/en/special_vehicles/products_64419.html (accessed September 1, 2024).
11. Bogdanov K.L. *Tyagovyy elektroprivod avtomobilya* [Electric traction drive of the car]. Moscow, Moskovskiy avtomobilno-dorozhnyy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2009. 57 p. (in Russ.).
12. Ren Q., Crolla D.A., Morris A. Effect of transmission design on electric vehicles (EV) performance. *Proc. IEEE vehicle power and propulsion conference*. Dearborn, 2009, pp. 1260–1265. DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289707>.
13. *Electrically scalable axial-module*. Available at: http://www.a3ps.at/site/sites/default/files/Workshop_Lightweight_Wolfgang%20Pflug_Projekt%20ESKAM.pdf (accessed March 1, 2024).
14. *UNDP pilots electric trucks for waste collection in central Vietnam*. 2023. Available at: <https://tuoitrenews.vn/news/society/20230518/undp-pilots-electric-trucks-for-waste-collection-in-central-vietnam/73193.html> (accessed August 29, 2024).
15. Miller J., Sen A., Teter J. *Status of vehicle standards in Europe and North America*. 2024. Available at: <https://www.theicct.org/wp-content/uploads/2024/06/TTDS24-Policy-Brief-WEB-A4-65008-v5.pdf> (accessed March 4, 2024).