

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОМОТОРА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЮНИБУСА

1

В ходе проектных работ по созданию высокоскоростных юнибусов четвёртого поколения была выявлена необходимость проектирования электромотора собственного производства, который бы в полной мере соответствовал потребностям и конструктивным особенностям проектируемых транспортных комплексов.

По результатам тягово-динамического расчёта высокоскоростного юнибуса был проведён обширный поиск электродвигателей, доступных на мировом рынке и имеющих необходимые характеристики по крутящему моменту, мощности, оборотам, а также массово-габаритным и экономическим показателям (см. табл. 1).

В большинстве случаев указанные производители являются значимыми и крупными лидерами рынка, выпускающими надёжную продукцию. Вентильные электродвигатели на постоянных магнитах в настоящее время очень модный и востребованный продукт, что объясняет разброс цен: от 6.000\$ REMY NT NVH 250-115 до 70.000\$ Brusa HSM1 (при довольно схожих характеристиках), – вроде бы выбрать есть из чего. Однако известно, что все вентильные электродвигатели без системы управления (инвертора) не работают, следовательно, необходимо приобрести ещё и инвертор (стоимость не менее 4.000\$) для каждого конкретного электродвигателя.

Инвертор для вентильного электродвигателя – это узко специализированное устройство, обладающее своим программным обеспечением, поэтому самостоятельно модифицировать программу не позволит производитель, следовательно, потребителю обеспечено последующее тесное многолетнее (и не бесплатное) общение с изготовителем.

Сдерживающим фактором при приобретении электродвигателя на «рынке», является то, что все продаваемые электродвигатели – технически законченные конструкции: спроектированные для конкретного заказчика, либо как законченная продукция в единственном варианте («бери что есть и не задавай лишних вопросов»).

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОМОТОРА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЮНИБУСА

2

Производитель/Марка	Мощность пост./пик. (кВт)	Момент пост./пик. (Н*м)	Напряжение, (V)	Обороты при макс. моменте. (об/мин.)	Способ крепления	Макс. темп., (°C)	Вес, (кг)	Тип мотора	Цена
UQM PowerPhase Pro 135	80/135	160/340	420	Нет данных	Фланец, шлицевой вал	По запросу	По запросу	Синхронный на постоянных магнитах	\$15200
UQM PowerPhase Select 145	85/145	250/400	420	Нет данных	Фланец, шлицевой вал	По запросу	По запросу	Синхронный на постоянных магнитах	\$28764
Yasa Motors Yasa 400	75/165	250/360	700	4500	Фланец+ Фланец	Масло до +65	24	Аксиальный на постоянных магнитах	Нет данных
REMY HVH 250-090	100/150	300/320	650	2600	Нет данных	До +160	33.5	Синхронный на постоянных магнитах	\$6611
REMY HT HVH 250-115	100/150	440/460	650	4000	Нет данных	До +160	43	Синхронный на постоянных магнитах	\$7206
GKN Driveline AF-230	128/200	290/500	Нет данных	3800	шлицевой вал	По запросу	57.5	Аксиальный на постоянных магнитах	Нет данных
Brusa HSM1-10.18.13-Co	90/187	185/495	400	3600	Шлицевая втулка	-45 +65	54	Синхронный с обмотками возбуждения	54000 euro инвертер 13972 euro
Brusa HSM1-10.18.13	93/156	165/305	400	4900	Шлицевая втулка	-45 +65	51	Синхронный с обмотками возбуждения	13740 euro
Enstroj EMRAX 268	100/200	250/500	400	4700	Фланец, шлицевой вал	-45 +65	20	Аксиальный на постоянных магнитах	6000 euro
Parker GVM210-200P	99/194	136/314	650	5200	шлицевой вал	Нет данных	45	Нет данных	Нет данных

Таблица 1. Сравнительные характеристики электродвигателей для мотор-колеса юнибуса

По указанным причинам применение покупных элементов трансмиссии: электродвигателя, инвертора и сопутствующих устройств – на стадии изготовления первого образца, на первый взгляд, является решением обоснованным, позволяющим в сжатые сроки собрать первый образец и провести испытания изделия в целом.

Анализ данных табл. 1 и сказанное выше показывает, что из доступных моделей для высокоскоростного юнибуса наиболее подходит электродвигатель фирмы **Enstroj EMRAX**, так как его показатель «**мощность/вес**» наилучший, как и достаточно низкая стоимость и доброжелательно настроенный производитель, готовый изменить отдельные элементы своего электродвигателя под наши требования

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОМОТОРА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЮНИБУСА

3

Ознакомление с модельным рядом электродвигателей Enstroj EMRAX, подтверждает их частичную пригодность для нашей конструкции.

Характеристики электродвигателей:

EMRAX 207 (Высокий / Средний / Low Voltage) 9,0 / 9,2 кг; крутящий момент 75 Нм непрерывный / 150 пик Нм; до 5000 RPM / 7000 RPMP; 75 кВт пик	EMRAX 228 (Высокий / Средний / Low Voltage) вес 12,0 / 12,3 кг; крутящий момент 125 Нм непрерывный / 250 Нм пикового; до 4500 RPM / 6000 RPMP; 100 кВт-пик	Новый EMRAX 268 HV (Высокий / Средний / Low Voltage) вес 19,9 / 20,3 кг; крутящий момент 250 Нм непрерывный / 500 Нм пикового; до 4000 RPM / 5000 RPMP; 200 кВт-пик
--	---	--

Поэтому, для наиболее полного удовлетворения специфических конструктивных особенностей проектируемых юнибусов, конструкторским коллективом ЗАО «Струнные технологии» (г. Минск) были разработаны два типа электродвигателей (с возможностью развития в дальнейшем в модельные ряды).

При проектировании мы стремились обеспечить высокое качество мотор-колеса за счёт минимизации и исключения при сборке так называемого «человеческого фактора» (для организации в будущем серийного производства), а именно:

1. Обмотка электромоторов – съёмная, выполнена проводником не круглого сечения, что позволит реализовать:

- машинную намотку;
- заполнение окна в 95% (при ручной намотке – не более 48%);
- соответствие образцов проектным требованиям – 100%;
- улучшение теплоотвода;
- увеличение вибростойкости.

2. Сердечники катушек выполнены не из шихтованного железа, а из прессованного (фирма Хёганс, Швеция), что позволяет:

- увеличить вибростойкость;
- упростить сборку.

Всё выше сказанное позволит максимально автоматизировать процесс производства, обеспечивая постоянство высокого качества «сердца» юнибуса – электропривода – в сочетании с его высокими техническими характеристиками.

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОМОТОРА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЮНИБУСА

4

Разработанные нами электродвигатели :

SkyWay-M1 (см. рис. 1) – вентильный аксиальный (роторы расположены по торцам статора) электромотор на постоянных магнитах.

SkyWay-M2 (см. рис. 2) – вентильный электромотор на постоянных магнитах с наружным ротором.

Конструктивные особенности:

Электродвигатель трёхфазный, вентильный, на постоянных магнитах, специально проектировался для использования в мотор-колёсах (безредукторные приводы). Конструкция виброустойчивая. Применён оригинальный способ крепления постоянных магнитов – наиболее слабого места подобных двигателей. Обмотка катушек выполнена из алюминиевого проводника с керамической изоляцией (разработка Сибирского Отделения РАН), что позволяет снизить вес обмотки и повысить её термостойчивость.

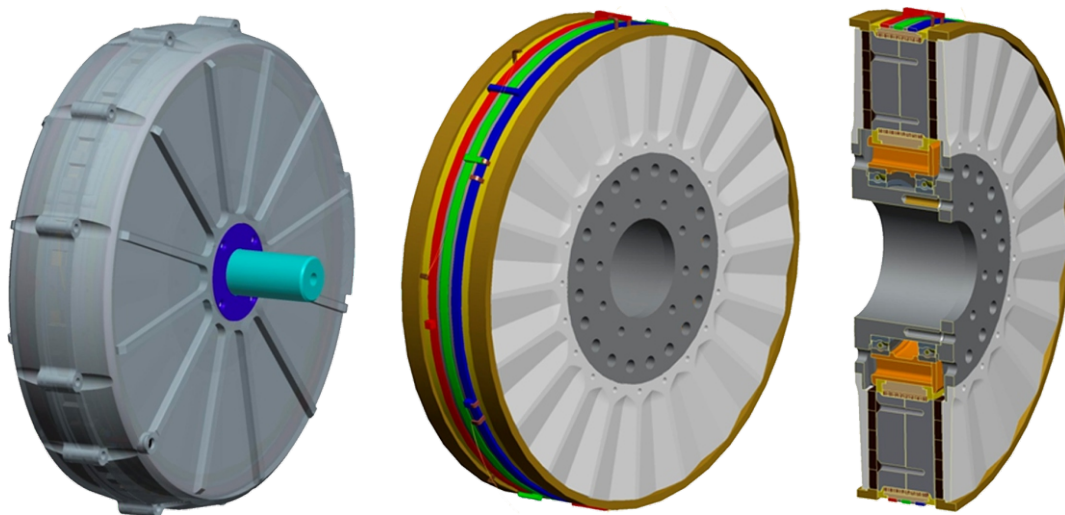


Рис. 1. Электродвигатель SkyWay-M1

Технические характеристики :

Мощность постоянная	100 кВт
Пиковая мощность	до 150 кВт
Крутящий момент	200 Нм
Пиковый момент	до 750 Нм
Обороты	до 5000 в минуту
Охлаждение	жидкостное
Диаметр наружный	385 мм
Диаметр внутренний	95 мм
Ширина	87 мм
Вес	50 кг
Электрический КПД	не менее 96 %

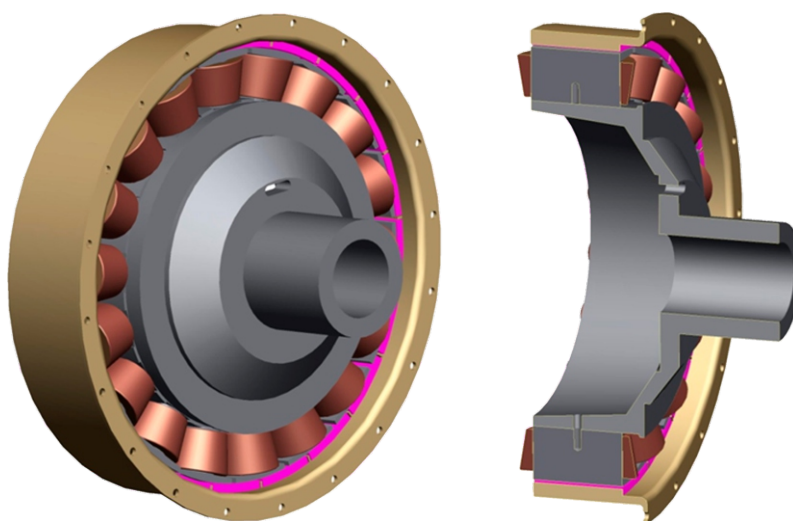


Рис. 2. Электродвигатель SkyWay-M2

Технические характеристики :

Мощность постоянная	40 кВт
Мощность пиковая	до 70 кВт
Момент постоянный	80 Нм
Пиковый момент	до 180 Нм
Обороты	до 5000 в минуту
Охлаждение	жидкостное или воздушное
Диаметр наружный	356 мм
Диаметр внутренний	232 мм
Ширина	85 мм
Вес	27 кг
Электрический КПД	не менее 96 %
Позволяет внутри разместить элементы тормозов или ступицы	

Мотор-колесо с двигателем SkyWay-M1 позволит юнибусу:

- 1) Развивать скорость в 500 км/ч при относительно небольшом диаметре колеса – порядка 50 см;
- 2) Высокий крутящий момент, высокие максимальные обороты (до 5000 оборотов в минуту) в сочетании с малым диаметром колеса и высокой мощностью двигателя, позволяют создавать большую тягу, что, в свою очередь, даёт возможность (в сочетании с другими конструктивными особенностями высокоскоростного юнибуса, относящимися к ноу-хау):
 - брать продольные уклоны пути до 30%;
 - равномерно разгоняться до расчётной скорости, без снижения штатного ускорения разгона (например, равного 1 м/с²), что снизит путь разгона юнибуса на 10 км и более. Это значительно улучшит логистику транспортной системы, в том числе уменьшит время в пути для пассажира, особенно при близком размещении со-седних станций (порядка 50 км).

3) Применение мотор-колеса с прямым приводом на колесо позволяет избежать установки редуктора, тем самым повысить общий КПД трансмиссии не менее чем на 5%, снизить шумность и повысить безотказность. Много ли это – повысить КПД трансмиссии на 5%? Если юнибус на постоянное движение потребляет 200 кВт мощности, то экономия 5% позволяет каждый час экономить 10 кВт х час или 2 литра условного топлива (например, дизельного), что за год при 20 рабочих часах в сутки даст экономию: $2 \times 20 \times 365 = 14\,600$ литров топлива (по нынешним ценам \$14 600). Таким образом, можно ожидать, что за десять лет эксплуатации юнибуса только эта экономия приведет к его полной окупаемости.

Малые габариты мотор-колеса с электродвигателем SkyWay-M2 собственной разработки, в сочетании с его малой массой, позволит значительно улучшить энергетическую эффективность юнибуса. В частности, размещение внутри электромотора элементов тормозов и ступицы позволяет уменьшить мидель (площадь поперечного сечения) его корпуса примерно на 0,2 м², что уменьшает мощность аэродинамического сопротивления при скорости 500 км/ч на 37 кВт. Это сэкономит энергию на высокоскоростное движение (в топливном эквиваленте): в час – 10 кг, в сутки (20 часов работы) – 200 кг, в год – 73 тонны, за срок службы (20 лет) – 1460 тонн, или сэкономит железнодорожный состав топлива (!). Если на сети дорог SkyWay в будущем будет работать хотя бы 3 миллиона высокоскоростных юнибусов (для сравнения: сегодня по дорогам мира “бегает” порядка миллиарда автомобилей; даже в таком мегаполисе, как Москва, их больше 3 млн.), то они сэкономят только на этой «мелочи» (уменьшении миделя корпуса на 0,2 м²) более 4 миллиардов тонн топлива, то есть столько, сколько сегодня ежегодно добывается нефти в мире.