

ВЫБОР ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ НА ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫЕ КОЛЕСНЫЕ ВОЕННЫЕ МАШИНЫ

Введение и актуальность темы. Возможности электрической трансмиссии: индивидуальное управление мощностью, подводимой к каждому ведущему колесу транспортной машины; накопление рекуперативной энергии торможения в аккумуляторы электрической энергии и дальнейшее ее использование, а также выполнение движения транспортной машины на аккумуляторах с более низким уровнем шума, тепловыделения и токсичных выбросов в сравнении с движением при работающем двигателе внутреннего сгорания обуславливают актуальность проведения научно-технических работ в направлении создания электрических трансмиссий, совершенствования их конструкций и внедрения на транспортные колесные машины разного назначения [1]. Это связано с тем, что перечисленные свойства позволяют повысить проходимость, маневренность транспортных колесных машин, улучшить их курсовую устойчивость на высоких скоростях движения, увеличить запас хода, а также повысить незаметность передвижения. Все эти характеристики являются важными для военных машин.

В настоящее время уже серийно выпускается большое разнообразие легковых и грузовых автомобилей, автобусов, тракторов, которые имеют электрический привод ведущих колес [2]. Некоторые образцы военных машин с электрической трансмиссией и гибридной энергетической установкой: SEP-Wheeled Шведской фирмы BAE Systems Hagglund, AHEAD и Shadow RST-V Американской фирмы General Dynamics Land Systems, HEMTT-A3 Американской фирмы Oshkosh Truck, Panhard Французской фирмы Panhard совместно с Rheinmetall Landsysteme и Giat Industries, HED Humvee Американской фирмы DRS Technologies совместно с UQM Technologies выпускаются небольшими партиями. Ведутся дальнейшие работы по совершенствованию конструкций опытных образцов военных машин с электрической трансмиссией [3].

Одним из главных узлов электрической трансмиссии является тяговый электродвигатель (ТЭД). Его выбор является важным этапом в начале проектирования электрической трансмиссии для любого вида транспортной машины, поскольку ТЭД в дальнейшем определяет тягово-скоростные и массово-габаритные характеристики проектируемой машины.

Цель и постановка задачи. Целью настоящей работы является определение требуемых механических характеристик ТЭД и поиск наиболее подходящей модели из выпускаемых ТЭД для проектирования электрической трансмиссии на легкобронированных колесных военных машинах (ЛКВМ) с индивидуальным приводом ведущих колес.

Расчет и анализ требуемых механических характеристик ТЭД. Для определения требуемых величин механической мощности и крутящего момента ТЭД проведем анализ массовых показателей ЛКВМ отечественного производства и предъявляемых к ним тактико-технических требований.

В результате анализа значений полной массы изделий Дозор-Б, БТР-3 и БТР-4, изготавливаемых в Украине, можно выделить три весовые категории ЛКВМ с колесной формулой 8x8. Это машины с полной массой до 18 т, 20 т и 24 т. Соответственно для ЛКВМ с колесной формулой 4x4 эти значения будут в половину меньше (до 9т, 10т и 12т).

Исходя из анализа тактико-технических характеристик рассматриваемых машин, они должны двигаться с максимальной скоростью по шоссе не менее 100 км/ч, преодолевать максимальный подъем по грунту в 30°, вертикальную стенку высотой не менее 0,5 м и иметь минимальную скорость движения в диапазоне 3..5 км/ч.

Необходимую силу тяги машины для преодоления максимального подъема и выполнения движения с максимальной скоростью определим из уравнения тягового баланса движения машины [4]:

$$P_{\text{тяги}} = (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot 9,81 \cdot m + k_g \cdot F \cdot \left(\frac{v_m}{3,6}\right)^2 + m \cdot \delta \cdot \gamma, \quad (1)$$

где $P_{\text{тяги}}$ – сила тяги на ведущих колесах машины, Н; f – коэффициент сопротивления качению; α – угол наклона дороги к горизонту, град; m – масса машины, кг; k_g – коэффициент сопротивления воздуха, Н·с²/м⁴; F – площадь лобовой проекции машины, м²; v_m – скорость движения машины, км/ч; δ – коэффициент учета вращающихся масс; γ – ускорение машины м/с².

Для вычисления необходимой силы тяги машины при движении на подъем под углом $\alpha = 30^\circ$ примем $f = 0,045$ и скорость $v_m = 5$ км/ч. При движении по прямой дороге $\alpha = 0^\circ$ примем $f = 0,015$ и скорость $v_m = 110$ км/ч. При этом $k_g = 0,8125$ Н·с²/м⁴, $F = 4,48$ м² и $\gamma = 0$ м/с² (в случае равномерного движения машины).

Расчет выполним для ЛКВМ с колесной формулой 8х8.

При условии равномерного распределения мощности между ведущими колесами необходимая сила тяги на одном колесе будет равна $P_k = P_{\text{тяги}} / 8$.

Крутящий момент на одном колесе транспортной машины вычислим по формуле:

$$M_k = P_k \cdot R_k, \quad (2)$$

где M_k – крутящий момент на одном колесе, Н·м; P_k – сила тяги на одном колесе, Н; R_k – радиус колеса, м. Примем $R_k = 0,53$ м.

Необходимую механическую мощность на одном колесе транспортной машины и на валу ТЭД вычислим по формулам [4]:

$$N_k = \frac{1}{3,6} \cdot P_k \cdot v_m, \quad N_{\text{ТЭД}} = \frac{N_k}{\eta_{кр}}, \quad (3)$$

где N_k – мощность на одном колесе, Вт; P_k – сила тяги на одном колесе, Н; v_m – скорость движения машины, км/ч; $N_{\text{ТЭД}}$ – механическая мощность на валу ТЭД, Вт; $\eta_{кр}$ – КПД колесного редуктора. Примем $\eta_{кр} \approx 0,96$, поскольку величина передаточного отношения планетарного колесного редуктора предполагается в диапазоне от 9 до 15.

Результаты расчетов при условии преодоления ЛКВМ подъема с наибольшим углом и выполнения движения с максимальной скоростью на прямой дороге приведены в таблице 1.

Таблица 1

Весовая категория машины, т	Значения при движении на подъем с углом $\alpha = 30^\circ$, $f = 0,045$ и $v_m = 5$ км/ч				Значения при движении по прямой дороге $\alpha = 0^\circ$, $f = 0,015$ и $v_m = 110$ км/ч			
	P_k , Н	M_k , Н·м	N_k , кВт	$N_{\text{ТЭД}}$, кВт	P_k , Н	M_k , Н·м	N_k , кВт	$N_{\text{ТЭД}}$, кВт
18	11885	6299	16,5	17,2	756	401	23,1	24,1
20	13206	6999	18,4	19,2	792	420	24,2	25,2
24	15847	8399	22	22,9	866	459	26,5	27,6

Из анализа результатов вычислений в таблице 1 следует, что наибольшая величина механической мощности ТЭД требуется для выполнения движения ЛКВМ с максимальной скоростью на прямой дороге, и наибольшая величина крутящего момента на колесе требуется для преодоления подъема по грунту с уклоном в 30°. При этом следует учитывать, что данные значения мощности и крутящего момента ТЭД на каждом колесе ЛКВМ должны поддерживать длительное время.

В соответствии с расчетами, которые представлены в источнике [5], для преодоления ЛКВМ с колесной формулой 8x8 вертикальной стенки высотой 0,5 м требуются значения силы тяги и крутящего момента на ведущих колесах меньше по величине, чем для преодоления подъема с уклоном $\alpha = 30^\circ$. Поэтому требуемые значения максимальной силы тяги и крутящего момента на каждом ведущем колесе машины будем определять из условия преодоления подъема с уклоном $\alpha = 30^\circ$.

Также следует учитывать, что в конце преодоления подъема на его вершине перед переваливанием на противоположную сторону у ЛКВМ с колесной формулой 8x8 кратковременно (до 30 с) становятся оторванными от грунта два передних колеса и суммарная сила тяги машины создается шестью колесами. Поэтому для завершения преодоления подъема машиной ТЭД должен кратковременно обеспечивать пиковый крутящий момент на колесе равный значению:

$$M_{к_пик} \geq \frac{8}{6} \cdot M_{к_max}, \quad (4)$$

где $M_{к_пик}$ – кратковременный пиковый крутящий момент на одном колесе в течение 30с, Н·м; $M_{к_max}$ – длительный максимальный крутящий момент на одном колесе, Н·м.

В статье [6] представлен расчет требуемой механической мощности ТЭД на каждом колесе ЛКВМ массой 25 т с колесной формулой 8x8. Основные результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2

№ п/п	Условия движения машины	Требуемая механическая мощность 1-го ТЭД на машине 25т с колесной формулой 8x8, кВт	Примечание
1	Движение на прямой дороге со скоростью 110 км/ч	30	Требуется длительное время
2	Преодоление подъема углом $\alpha = 30^\circ$ со скоростью 5 км/ч	23,5	Требуется длительное время
3	Выполнение разгона до 30 км/ч за 5 с	32,5	Требуется кратковременно
4	Выполнение разгона до 70 км/ч за 25 с	37,5	Требуется кратковременно
5	Выполнение разгона до 110 км/ч за 75 с	42,5	Требуется кратковременно

Из таблицы 2 следует, что максимальная величина длительной механической мощности ТЭД равна 30 кВт (п.1). Приведенные величины механической мощности в п.3, 4, 5 превышают величину в п.1 и требуются кратковременно. Однако в виду того, что кратковременная пиковая механическая мощность у большинства моделей современных ТЭД может поддерживаться до 30 с, то для обеспечения динамичного разгона ЛКВМ до максималь-

ной скорости движения целесообразно выбирать ТЭД с максимальной длительной механической мощностью 42,5 кВт, что в 1,417 раз больше механической мощности, которая необходима для движения машины с максимальной скоростью (п.1).

Таким образом получаем, что для проектирования электрической трансмиссии по схеме передачи мощности от ТЭД на каждое колесо ЛКВМ массой от 18 т до 25 т с колесной формулой 8x8 следует рассмотреть модели ТЭД из диапазона от 24,5 кВт до 42,5 кВт выходной номинальной механической мощности.

Проведем анализ характеристик существующих ТЭД из данного диапазона мощностей.

Анализ характеристик изготавливаемых ТЭД. В настоящее время ТЭД для тягового электропривода на транспортные колесные машины изготавливаются компаниями Brusa (Швейцария), ZYTEK, Yasa Motors Ltd, GKN Driveline (Англия), Magnet-Motor (Германия), Enstroj (Словения), UQM Technologies (Америка), Golden Motor (Китай). Проведем анализ характеристик некоторых моделей ТЭД от разных производителей.

В рассматриваемом диапазоне мощностей компанией Brusa выпускается ТЭД HSM1-10.18.04 синхронного типа с постоянными магнитами, 3-х фазный, переменного тока, длительной механической мощности 28 кВт. Его внешний вид и характеристики изменения механической мощности, крутящего момента представлены на рис.1 [7].

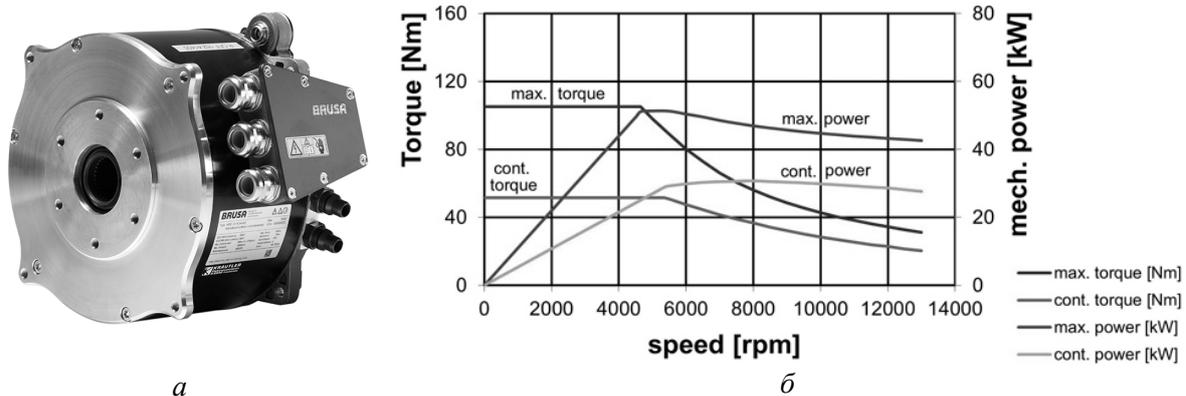


Рис.1. Тяговый электродвигатель HSM1-10.18.04 компании Brusa:

a – внешний вид ТЭД; *б* – зависимости изменения выходной механической мощности и крутящего момента от частоты вращения вала двигателя

Данный двигатель применяется с инвертером DMC514 на 360..450 В, имеет длительную механическую мощность 28 кВт в диапазоне скоростей 6000..10000 мин⁻¹, длительный крутящий момент 52 Н·м в диапазоне скоростей 0..5200 мин⁻¹, максимальную частоту вращения 13000 мин⁻¹ с крутящим моментом на валу 20 Н·м, коэффициент полезного действия (КПД) 95%, массу 26 кг, габаритные размеры 294x323x181 мм, рабочий диапазон температур от - 40 до + 80°С, жидкостное охлаждение и степень защиты IP67. Может развивать в течение 30 с пиковую механическую мощность 51 кВт в диапазоне скоростей 4500..6000 мин⁻¹ и пиковый крутящий момент 98 Н·м в диапазоне скоростей 0..4500 мин⁻¹.

Величина длительного крутящего момента ТЭД HSM1-10.18.04 меньше необходимых величин крутящих моментов на ведущих колесах ЛКВМ, требуемых для преодоления подъема по грунту с уклоном в 30° и движения с максимальной скоростью на прямой дороге. Для выполнения этих условий между ТЭД и ведущим колесом машины устанавливаются колесный редуктор. Передаточное число колесного редуктора и необходимую частоту вращения вала ТЭД вычислим по формулам [4]:

$$i_{кр} = \frac{M_{к}}{M_{ТЭД} \cdot \eta_{кр}}; \quad n_{ТЭД} = \frac{v_{м} \cdot i_{кр}}{0,3768 \cdot R_{к}}, \quad (5)$$

где $i_{кр}$ – передаточное число колесного редуктора; $M_{к}$ – крутящий момент на одном колесе, Н·м; $M_{ТЭД}$ – крутящий момент на валу ТЭД, Вт; $\eta_{кр}$ – КПД колесного редуктора; $n_{ТЭД}$ – частота вращения вала ТЭД, мин⁻¹; $v_{м}$ – скорость движения машины, км/ч; $R_{к}$ – радиус колеса, м ($R_{к} = 0,53$ м).

При расчете передаточного числа колесного редуктора примем $\eta_{кр} \approx (0,96)^2 \approx 0,9216$, поскольку значения передаточного числа превышают 15 и редуктор будет состоять из двух планетарных передач.

В результате получаем для ЛКВМ массой до 18 т с ТЭД HSM1-10.18.04 на каждое колесо для обеспечения преодоления подъема по грунту с уклоном в 30° необходимо $i_{кр} = 131,44$ при крутящем моменте 52 Н·м на валу ТЭД. Данное передаточное число можно получить в результате последовательного соединения 2-х передач с передаточными числами 11,465. При этом для обеспечения подъема со скоростью 5 км/ч требуется $n_{ТЭД} = 3291$ мин⁻¹, что соответствует диапазону скоростей с длительным крутящим моментом 52 Н·м для данного ТЭД.

Для обеспечения движения ЛКВМ со скоростью 110 км/ч потребуется $i_{кр} = 21,76$ при крутящем моменте 20 Н·м на валу ТЭД. Данное передаточное число можно получить также в результате последовательного соединения 2-х передач с передаточными числами 11,465 и 1,898. При этом должна быть $n_{ТЭД} = 11986$ мин⁻¹, что не превышает максимальной частоты вращения вала ТЭД.

Таким образом, в случае применения ТЭД HSM1-10.18.04 на ЛКВМ массой до 18 т потребуется между ТЭД и ведущим колесом установить колесный редуктор, состоящий из двух передач: двухступенчатого планетарного ряда с передаточными числами 11,465 и 1,898 и последовательно соединенной с ним одноступенчатой передачей с передаточным числом 11,465.

В результате выше изложенных расчетов по формулам (5), для ЛКВМ массой до 20 т с ТЭД HSM1-10.18.04 на каждое колесо потребуется между ТЭД и ведущим колесом установить также две передачи: двухступенчатый планетарный ряд с передаточными числами 12,085 и 1,885 и последовательно соединенная с ним одноступенчатая передача с передаточным числом 12,085.

На ЛКВМ массой 24 т с ТЭД HSM1-10.18.04 на каждое колесо движение с максимальной скоростью 110 км/ч выполняться не будет. Поскольку установка двух последовательно соединенных передач приводит к снижению КПД передачи мощности от 0,96 до 0,9216. В этом случае для обеспечения движения ЛКВМ со скоростью 110 км/ч необходима длительная механическая мощность ТЭД не менее 28,75 кВт, что превышает данное значение у ТЭД HSM1-10.18.04.

Величина пикового крутящего момента у ТЭД HSM1-10.18.04 в 1,8846 раза больше максимального значения длительного крутящего момента, что удовлетворяет условию (4).

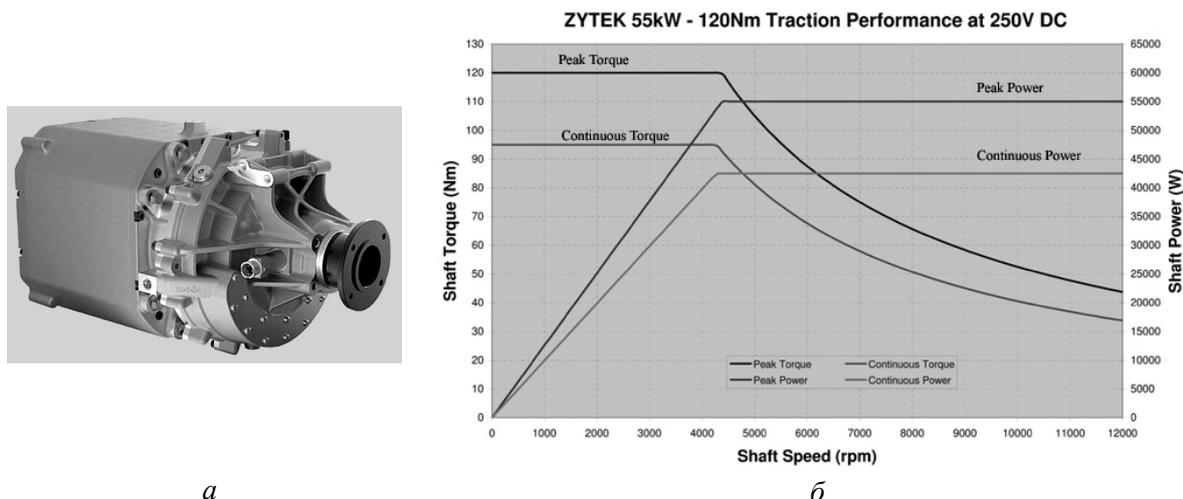
Также следует отметить, что ранее компания Brusa выпускала модель ТЭД HSM6.17.12 длительной механической мощностью 37 кВт массой 53 кг. С развитием технологии изготовления ТЭД синхронного типа компании Brusa удалось увеличить выходную механическую мощность, не увеличивая массы двигателя. Например, модели HSM1-6.17.12 и HSM1-10.18.13 длительной механической мощностью 70 и 93 кВт имеют массу до 52 кг. Это положительно влияет на массово-габаритные показатели

проектируемых транспортных машин с электрическим приводом. Однако применение ТЭД с длительной механической мощностью более 42,5 кВт для электрических трансмиссий рассматриваемого класса ЛКВМ с передачей мощности от ТЭД на колесо приведет к невозможности реализации этой мощности. Поскольку суммарная потребляемая мощность всех ТЭД в машине будет превышать общую мощность, вырабатываемую энергетической установкой и отдаваемую накопителями электрической энергии (с учетом потерь в ТЭД, в электронных блоках системы управления, генераторе). Поэтому модель HSM1-6.17.12 можно применять при реализации передачи механической мощности от ТЭД в мост. В этом случае потребуется четыре ТЭД длительной механической мощностью 70 кВт вместо восьми, что обеспечит выполнение энергетического баланса между источниками и потребителями электрической энергии.

Компания Vgusa также выпускает асинхронный ТЭД ASM1-6.17.12 с длительной механической мощностью 45 кВт и массой 55,9 кг и синхронный ТЭД с токовым возбуждением SSM1-6.17.10 мощностью 60 кВт и массой 49 кг. Однако их длительные механические мощности превышают величину допустимого максимального значения.

Компания Zytec выпускает бесколлекторный (бесщеточный) ТЭД постоянного тока с постоянными магнитами IDT 120-55 с длительной механической мощностью 42 кВт. Его внешний вид и характеристики изменения механической мощности, крутящего момента представлены на рис.2 [8].

Данный двигатель применяется с инвертером EPF2-3 на 250..400В, имеет длительную механическую мощность 42 кВт в диапазоне скоростей 4300..12000 мин⁻¹,



a

б

Рис. 2. Тяговый электродвигатель IDT 120-55 компании Zytec:

a – внешний вид ТЭД; *б* – зависимости изменения выходной механической мощности и крутящего момента от частоты вращения вала двигателя

длительный крутящий момент 95 Н·м в диапазоне скоростей 0..4300 мин⁻¹, максимальную частоту вращения 12000 мин⁻¹ с крутящим моментом на валу 32 Н·м, массу 62 кг из них инвертор 12 кг, габаритные размеры 313x361x433 мм вместе с инвертором, рабочий диапазон температур от – 20 до + 65°С (хранение до – 40°С), жидкостное охлаждение и степень защиты IP67. Может развивать в течение 30 с пиковую механическую мощность 55 кВт в диапазоне скоростей 4500..12000 мин⁻¹ и пиковый крутящий момент 120 Н·м в диапазоне скоростей 0..4500 мин⁻¹.

В результате выполнения расчетов по формулам (5) было получено, что для ЛКВМ массой 18 т необходимо между ТЭД IDT 120-55 и ведущим колесом установить колесный редуктор, состоящий из двух передач: двухступенчатого планетарного ряда с передаточными числами 6,276 и 1,14 и последовательно соединенной с ним одноступен-

чатой передачей с передаточным числом 11,465.

Для ЛКВМ массой 20 т потребуется установить также две передачи: двухступенчатый планетарный ряд с передаточными числами 6,615 и 1,14 и последовательно соединенная с ним одноступенчатая передача с передаточным числом 12,085.

Для ЛКВМ массой 24 т потребуется установить тоже две передачи: двухступенчатый планетарный ряд с передаточными числами 7,949 и 1,236 и последовательно соединенная с ним одноступенчатая передача с передаточным числом 12,085.

Масса ТЭД IDT 120-55 больше массы HSM1-10.18.04 на 24 кг. При этом передаточные числа двухступенчатого планетарного ряда для IDT 120-55 существенно меньше, чем для HSM1-10.18.04, что свидетельствует об уменьшении массы колесного редуктора.

Величина пикового крутящего момента у ТЭД IDT 120-55 в 1,263 раза больше максимального значения длительного крутящего момента, что не удовлетворяет условию (4) и ЛКВМ с колесной формулой 8x8 не сможет завершить преодоление подъема с уклоном в 30°. Поэтому ТЭД IDT 120-55 можно применять только на ЛКВМ с колесной формулой 4x4.

Также в рассматриваемом диапазоне мощностей компанией Zytek изготавливается коробка передач с двумя моторами, имеющими длительную механическую мощность 15 кВт. В сумме получается 30 кВт длительной механической мощности от ТЭД. Данная конструкция представлена на рис.3 [8].

Масса одного ТЭД равна 12,8 кг. Масса коробки передач 11 кг. В результате общая масса составляет 36,6 кг. При этом коробка передач имеет четыре передачи с передаточными числами I – 31,1; II – 21,9; III – 15,6; IV – 11,1.

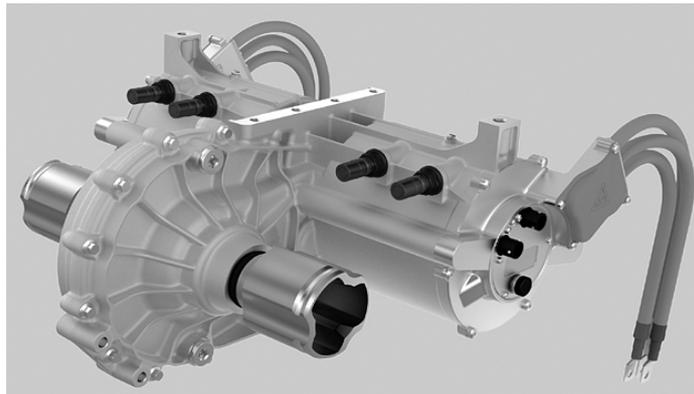


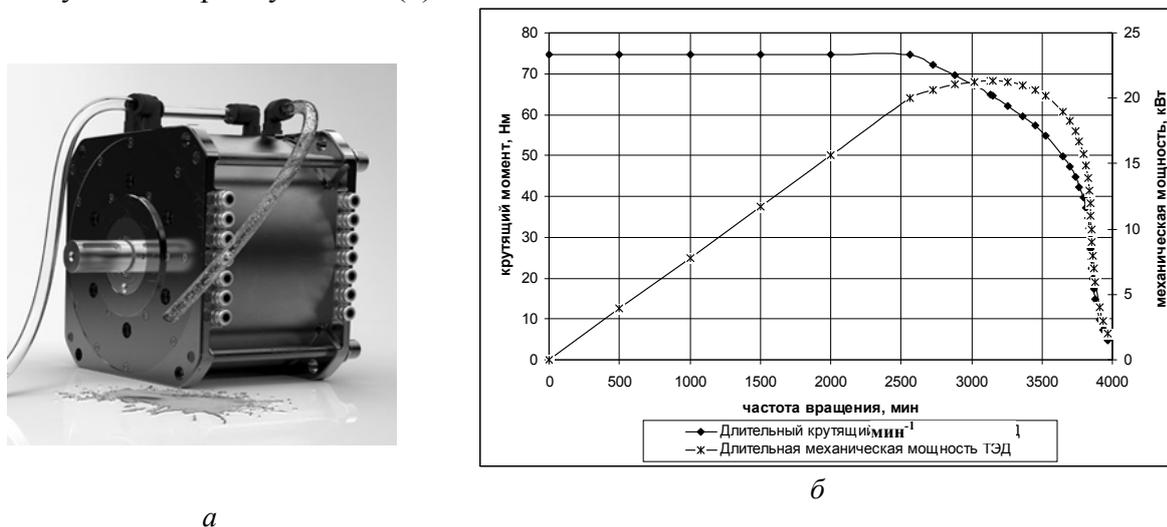
Рис. 3. Внешний вид коробки передач компании Zytek с двумя ТЭД длительной механической мощностью по 15 кВт

ТЭД синхронного типа с постоянными магнитами, 3-х фазные, переменного тока, длительной механической мощностью 15 кВт каждый (в диапазоне скоростей 3000...14000 мин⁻¹), длительным крутящим моментом 47 Н·м (в диапазоне скоростей 0...3000 мин⁻¹), максимальной частотой вращения 14000 мин⁻¹ при крутящем моменте на валу 10 Н·м могут развивать в течение 30 с пиковую механическую мощность 25 кВт в диапазоне скоростей 4000...14000 мин⁻¹ и пиковый крутящий момент 64 Н·м в диапазоне скоростей 0...3900 мин⁻¹. Величина пикового крутящего момента в 1,36 раза больше максимального значения длительного крутящего момента, что удовлетворяет условию (4).

В случае разработки конструкции колесного редуктора с передачей механической мощности от 2-х ТЭД длительной мощности до 21 кВт на колесо заслуживает внимания ТЭД НРМ-20кВт с длительной механической мощностью в диапазоне 20...25 кВт, изготавливаемый компанией Golden Motor. Его внешний вид и характеристики изменения длительной механической мощности, крутящего момента представлены на рис.4 [9].

Данный двигатель представляет собой бесколлекторный ТЭД постоянного тока с посто-

яними магнитами. Он работает от напряжений 72В, 96В и 120В. При 96В может вырабатывать длительную механическую мощность 21кВт в диапазоне скоростей 2850...3360 мин⁻¹, длительный крутящий момент 74,7 Н·м в диапазоне скоростей 0...2560 мин⁻¹, максимальную частоту вращения 3911 мин⁻¹ с крутящим моментом на валу 9,74 Н·м. При напряжении 120 В может вырабатывать в течение 30 с пиковую механическую мощность 50 кВт и пиковый крутящий момент 160 Н·м. Имеет массу 39 кг, габаритные размеры 300x300x250 мм, КПД до 90%. Величина пикового крутящего момента в 2,14 раза больше максимального значения длительного крутящего момента, что удовлетворяет условию (4).



а

б

Рис. 4. ТЭД NPM-20kW компании Golden Motor:

а – внешний вид ТЭД; б – зависимости изменения длительной механической мощности и крутящего момента от частоты вращения вала двигателя

В результате выполнения расчетов по формулам (5) было получено для ЛКВМ массой 18 т необходимо между ТЭД и ведущим колесом установить колесный редуктор, состоящий из двух передач: двухступенчатого суммирующего планетарного ряда с передаточными числами 8,16 и 1 и последовательно соединенной с ним одноступенчатой передачей с передаточным числом 5,61.

Для ЛКВМ массой 20 т потребуется установить также две передачи: двухступенчатый суммирующий планетарный ряд с передаточными числами 8,646 и 1 и последовательно соединенная с ним одноступенчатая передача с передаточным числом 5,88.

Для ЛКВМ массой 24 т потребуется установить тоже две передачи: двухступенчатый планетарный ряд с передаточными числами 9,52 и 1 и последовательно соединенная с ним одноступенчатая передача с передаточным числом 6,42.

Таким образом, в сравнении с предыдущими моделями ТЭД двигатель NPM-20kW имеет диапазон изменения скоростей от 0 до 4000 мин⁻¹. Два ТЭД NPM-20kW обеспечивают длительный крутящий момент 149,4 Н·м, что позволяет уменьшить общее передаточное число колесного редуктора, а соответственно его массу и габаритные размеры. Более низкий уровень рабочих напряжений данного ТЭД позволяет упростить конструкцию энергетической установки для его питания и подбор элементов накопления электрической энергии.

К недостаткам модели ТЭД NPM-20kW мощностью 20...25 кВт компании Golden Motor можно отнести его массу. Масса 2-х ТЭД будет составлять 78 кг, что на 28 кг больше модели IDT 120-55 с длительной механической мощностью 42 кВт, но при этом разность в весе может компенсироваться уменьшением массы колесного редуктора и в результате общая масса ТЭД с колесным редуктором может незначительно отличаться в рассмотренных вариантах.

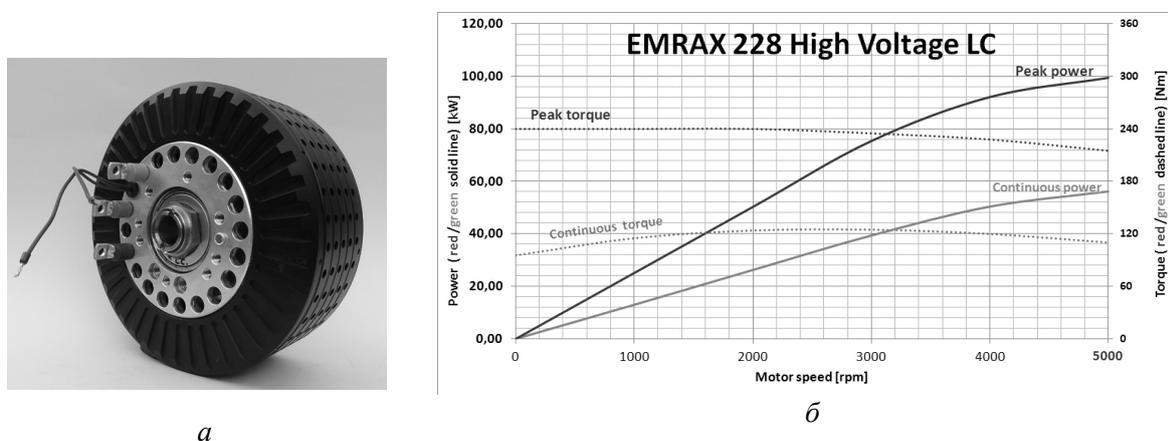
Новое перспективное направление в изготовлении ТЭД освоили компании Yasa

Motors Ltd (Англия) и Enstroj (Словения). Несколько лет назад они начали серийное изготовление вентильных индукторных ТЭД с аксиальным (независимым) возбуждением. Данный тип ТЭД обладает хорошими массо-габаритными характеристиками, высокой надежностью, перегрузочной способностью, большим диапазоном регулирования крутящего момента. Однако он имеет сложную технологию изготовления.

Компания Yasa Motors Ltd изготавливает ТЭД с длительной механической мощностью от 50 до 100 кВт. Компания Enstroj выпускает ТЭД с длительной механической мощностью от 20 до 120 кВт.

В диапазоне до 42 кВт выпускаются модели ТЭД EMRAX 207 и EMRAX 228. Они имеют длительную механическую мощность 20...35 кВт и 30...50 кВт соответственно в диапазоне скоростей 3000...5000 мин⁻¹. Максимальный длительный крутящий момент 75 Н·м и 125 Н·м соответственно в диапазоне скоростей 1500...4000 мин⁻¹. Кратковременный пиковый крутящий момент 150 Н·м и 240 Н·м соответственно в диапазоне скоростей 0...2100 мин⁻¹. КПД 93...96% и массу 9,4 кг и 12,3 кг соответственно.

На рис.5 представлены внешний вид и характеристики изменения механической мощности, крутящего момента ТЭД EMRAX 228 [10].



a

б

Рис. 5. Тяговый электродвигатель EMRAX 228 компании Enstroj:

a – внешний вид ТЭД; *б* – зависимости изменения выходной механической мощности и крутящего момента от частоты вращения вала двигателя

Данный двигатель имеет три варианта исполнения по питанию: High Voltage 50..600 В, Medium Voltage 50..450 В и Low Voltage 24..150 В. Может быть воздушного, жидкостного и комбинированного охлаждения со степенью защиты IP21 и IP67. Развивает длительный крутящий момент на 30 Н·м больше, чем у модели IDT 120-55 с длительной механической мощностью 42 кВт. При этом масса EMRAX 228 на 37,7 кг меньше массы IDT 120-55. Это позволяет уменьшить массу электрической трансмиссии для ЛКВМ с колесной формулой 8x8 на 301,6 кг в сравнении с применением ТЭД модели IDT 120-55 компании Zytex.

Модель ТЭД EMRAX 228 является наиболее подходящей для проектирования мотор-колес для рассматриваемого класса ЛКВМ.

Заключение. Проведенные расчеты и анализ требуемых механических характеристик ТЭД для электрической трансмиссии на ЛКВМ с индивидуальным приводом ведущих колес показали:

1. Для схемы индивидуального привода ведущих колес на ЛКВМ следует применять ТЭД с длительной механической мощностью величиной не менее значения, которое необходимо для движения машины с максимальной скоростью с учетом КПД колесного редуктора, и подводимой электрической мощностью величиной, которая для

всех ТЭД не должна превышать общего значения вырабатываемой электрической мощности энергетической установкой и отдаваемой мощности накопителями электрической энергии.

2. Наибольшая величина длительного крутящего момента ТЭД через колесный редуктор должна обеспечивать преодоление машиной подъема с уклоном в 30°.

3. Величина пикового крутящего момента у ТЭД должна быть не менее чем в 8/6 раз больше максимального значения длительного крутящего момента для обеспечения ЛКВМ колесной формулой 8x8 завершения преодоления подъема с уклоном в 30°.

4. Для обеспечения динамичного разгона ЛКВМ до максимальной скорости следует применять ТЭД с максимальной длительной механической мощностью в 1,417 раз больше механической мощности, которая необходима для движения с максимальной скоростью.

Также из анализа характеристик выпускаемых ТЭД следует:

5. Для получения допустимых массово-габаритных характеристик колесных редукторов для установки на ЛКВМ с электрической трансмиссией по схеме индивидуального привода ведущих колес необходимо выбирать ТЭД с длительным крутящим моментом не менее 100 Н·м и диапазоном скоростей от 0 до 5000 мин⁻¹.

Выводы. 1. Для проектирования электрической трансмиссии по схеме индивидуального привода ведущих колес на ЛКВМ массой от 18 т до 25 т с колесной формулой 8x8 или массой от 9 т до 12,5 т с колесной формулой 4x4 следует выбирать ТЭД из диапазона от 30 до 42,5 кВт выходной длительной механической мощности.

2. В случае применения схемы электрической трансмиссии с передачей механической мощности от ТЭД в мост на ЛКВМ массой от 18 т до 25 т с колесной формулой 8x8 или массой от 9 т до 12,5 т с колесной формулой 4x4 следует выбирать ТЭД из диапазона от 60 до 85 кВт выходной длительной механической мощности.

3. Для схемы индивидуального привода ведущих колес с установкой ТЭД на базу ЛКВМ по своим характеристикам наиболее подходящими являются бесколлекторные (вентильные) ТЭД постоянного тока с постоянными магнитами и вентильные индукторные ТЭД с аксиальным (независимым) возбуждением.

4. Для разработки мотор-колеса в схеме индивидуального привода ведущих колес наиболее подходящим по большинству параметров является вентильный индукторный ТЭД с аксиальным возбуждением.

Литература: 1. Стримовский С.В. Перспективные направления повышения тягово-скоростных и топливо-экономичных характеристик военных машин / С.В. Стримовский // *Механіка та машинобудування*. – 2012. – №2. – С 165–177. 2. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками: Учебное пособие / [С.В. Бахмутов, А.Л. Карунин, А.В. Круташов и др.] – М.: МГТУ «МАМИ», 2007. – 71 С. 3. Стримовский С.В. Анализ трансмиссий современных легкобронированных колесных военных машин и их влияние на параметры подвижности / С.В. Стримовский, Ю.А. Слюсаренко, В.М. Соловьев // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2014. – №3. – С. 97 – 107. 4. Александров Е.Е. Тягово-скоростные характеристики быстроходных гусеничных и полноприводных колесных машин. / Е.Е. Александров, В.В. Епифанов, Н.Г. Медведев, А.В. Устиненко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 124 с. 5. Селифонов В.В. Теория автомобиля: Учебное пособие. / В.В. Селифонов, А.Ш. Хусаинов, В.В. Ломакин. – М.: МГТУ «МАМИ», 2007. – 102 С. 6. Волонцевич Д.О. Тяговый баланс перспективного колесного бронетранспортера с электромеханической трансмиссией / Д.О. Волонцевич, Е.А. Веретенников, Я.М. Мормило, та ін. // *Вісник НТУ «ХПИ»*. Серія: Транспортне машинобудування. – Харків : НТУ «ХПИ», 2017. – № 42 (948). – С. 17–22. 7. Technical Specifications HSM1-10.18.04 – Режим доступа <http://www.brusa.biz/en/products/drive/motor-400-v/hsm1-101804.html> – Дата обращения: 25.02.2017. 8. Standard Products Zytex IDT 120-55 – Режим доступа <http://www.zytekautomotive.co.uk/products/electric-engines/55kw> – Дата обращения: 25.02.2017. 9. BLDC безщеточный мотор постоянного тока 20 кВт 96В жидкостное охлаждение – Режим доступа <http://goldenmotor.ua/product/bldc-bezshetochnyi-motor-postojannogo-toka-20kvt-96v-zhidkostnoe-ohlazhdenie> – Дата обращения: 25.02.2017. 10. EMRAX 228 motors/ generators – Режим

доцмына <http://www.enstroj.si/Electric-products/emrax-228-motorsgen.html> – Дата обращения: 25.02.2017.

Bibliography (transliterated): 1. Strimovskiy S.V. *Advanced direction increase tractive, velocity and fuel-efficient characteristics military vehicles* / S.V Strimovskiy // *Mehanika ta mashinobuduvannya*. – 2012. – №2. – P. 165–177. 2. *Structural schemes vehicles hybrid power units: Teaching aid* / [S.V. Bahmytov, A.L. Karunin, A.V. Krutashov and other] – M.: MGTU «MAMI», 2007. – 71 P. 3. Strimovskij S.V. *The analysis of transmissions modern easy-armour wheel military vehicles and their influence on mobility parameters* / S.V Strimovskiy, J.A. Sljusarenko, V.M. Solovjov // *Integrovani tehnologii ta energozberegennia*. – 2014. – №3. – P. 97–107. 4. E.E. Aleksandrov, V.V. Epifanov, N.G. Medvedev, A.V. Ustinenko *Tjagovo-skorostnye harakteristiki bystrohodnyh gusenichnyh i polnoprivodnyh kolesnyh mashin* [Trailer-speed characteristics of high-speed track and four-wheel drive wheeled vehicles]. Kharkiv, NTU "KhPI" publ., 2007, 124 p. 5. Selifonov V.V. *Theory vehicle: Teaching aid* / V.V. Selifonov, A.Sh. Husainov, V.V. Lomakin. – M.: MGTU «MAMI», 2007. – 102 P. 6. Volontsevich D. O. *Traction balance for perspective wheeled armored personnel carrier with electromechanical transmission* / D. O. Volontsevich, E. A. Veretennikov, Ya. M. Mormilo, A. S. Yaremchenko, V. O. Karpov // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Transport machine building*. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 42 (948). – P. 17–22. 7. *Technical Specifications HSM1-10.18.04* – Available at <http://www.brusa.biz/en/products/drive/motor-400-v/hsm1-101804.html> – Accessed: 25.02.2017. 8. *Standard Products Zytec IDT 120-55* – Available at <http://www.zytekautomotive.co.uk/products/electric-engines/55kw> – Accessed: 25.02.2017. 9. *BLDC Brushless DG Motor 20 kW 96V Liquid cooling* – Available at <http://goldenmotor.ua/product/bldc-bezshetochnyj-motor-postojannogo-toka-20kvt-96v-zhidkostnoe-ohlazhdenie> – Accessed: 25.02.2017. 10. *EMRAX 228 motors/ generators* – Available at <http://www.enstroj.si/Electric-products/emrax-228-motorsgen.html> – Accessed: 25.02.2017.

Стрімовський С.В.

ВИБІР ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТРАНСМІСІЇ НА ЛЕГКОБРОНЬОВАНІ КОЛІСНІ ВІЙСЬКОВІ МАШИНИ

У статті виконано розрахунок і аналіз необхідних механічних характеристик тягового електродвигуна для проектування електричної трансмісії на колісні військові машини. Проведено порівняльний аналіз характеристик тягових електродвигунів, що випускаються різними виробниками, та обрано тип тягового електродвигуна і модель, яка по більшості параметрів підходить для проектування електричної трансмісії на колісні військові машини з індивідуальним приводом ведучих коліс.

Стримовский С.В.

ВЫБОР ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ НА ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫЕ КОЛЕСНЫЕ ВОЕННЫЕ МАШИНЫ

В статье выполнены расчет и анализ необходимых механических характеристик тягового электродвигателя для проектирования электрической трансмиссии на колесные военные машины. Проведен сравнительный анализ характеристик тяговых электродвигателей, которые выпускаются разными производителями, и выбран тип тягового электродвигателя и модель, которая по большинству параметров подходит для проектирования электрической трансмиссии на колесные военные машины с индивидуальным приводом ведущих колес.

S. Strimovskiy

THE CHOICE DRIVE MOTOR FOR DESIGNING ELECTRIC TRANSMISSION ON EASY-ARMOUR WHEELED MILITARY VEHICLES

In article the execute calculation and analysis necessary mechanical characteristic drive motor for designing electric transmission on wheeled military vehicles. The carrying out comparative analysis characteristic drive motors, which is produced different company's, and to decide type drive motor and model, which on most features approach for designing electric transmission on wheeled military vehicles with individual drive driving-wheels.