

**ГУСЕНИЧНЫЕ МАШИНЫ
С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ**

**TRACKED VEHICLES WITH ELECTROMECHANICAL
TRANSMISSION**

Жданович Ч. И., канд. техн. наук, доц.,
Разганов А. Ю., магистрант,
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
Ch. Zhdanovich, Ph.D. in Eng., Ass. Prof.,
A. Razganov, Master Student,
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

В статье рассмотрены гусеничные машины с гибридной электромеханической трансмиссией, приведены их основные параметры, характеристики электрических машин, описаны преимущества и недостатки конкретных моделей.

This paper examines tracked vehicles with a hybrid electromechanical transmission, provides their main parameters, characteristics of electric machines, and describes the advantages and disadvantages of specific models.

Ключевые слова: гусеничная машина, электромеханическая трансмиссия, гибрид, электродвигатель.

Keywords: tracked vehicle, electromechanical transmission, hybrid, electric motor.

ВВЕДЕНИЕ

Гусеничные машины (ГМ) с электромеханической трансмиссией (ЭМТ) являются перспективным направлением развития военной, гражданской, сельскохозяйственной, промышленной и другой техники. Они обладают рядом преимуществ перед традиционными гусеничными машинами с механической трансмиссией, таких как: высокая эффективность передачи мощности, плавность хода, маневренность, высокая точность управления скоростью и тяговым усилием, возможность рекуперации энергии при торможении, снижение уровня шума и вибрации, упрощение конструкции и обслу-

живания, обеспечение оптимального режима работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). В общем случае электромеханическая трансмиссия ГМ конструктивно состоит из электрических машин (генератора и электродвигателя), преобразователя, механического привода и системы управления. Электродвигатель преобразует электрическую энергию, получаемую от генератора, в механическую. Электронный преобразователь регулирует напряжение и частоту тока, подаваемого на электродвигатель. Механический привод передает крутящий момент от электродвигателя к ведущим колесам. Система управления обеспечивает согласованную работу всех элементов ЭМТ. Есть 3 основные схемы гибридных электромеханических трансмиссий: последовательная, параллельная и смешанная. На гусеничных машинах обычно применяются параллельная или смешанная.

В данной статье рассматриваются особенности, преимущества и недостатки существующих гусеничных машин с электромеханической трансмиссией, а также возможные проблемы и ограничения при эксплуатации. Решение использования электромеханической трансмиссии на гусеничном тракторе позволит ускорить и упростить выполнение сельскохозяйственных технологических операций.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Одни из первых попыток применения электромеханической трансмиссии на ГМ предпринимались в начале 20 века, например на таких машинах как французский танк Char 2С, немецкий танк Tiger (Р), американские танки М2А3, Т23, Т1Е1, английский танк Т0G II, советский танк ИС-6.

Французский танк Char 2С – французский сверхтяжелый танк. Разработан во время Первой мировой войны. Основные технические характеристики Char 2С [1]:

- габаритные размеры: длина корпуса – 10 270 мм, ширина корпуса – 3000 мм, высота – 4090 мм;
- боевая масса – 75 т;
- силовая установка – два карбюраторных двигателя Mercedes GIIIa мощностью 2×180 л. с.;
- максимальная скорость – 15 км/ч (по шоссе);
- запас хода – до 150 км.

Силовая установка танка включает 2 двигателя внутреннего сгорания ГПШ фирмы «Mercedes», имеющих мощность 180 л. с. каждый. Двигатели расположены в центре корпуса танка, в машинном отделении. Трансмиссия состоит из двух генераторов постоянного тока, приводимых от двигателей внутреннего сгорания, и двух электромоторов. В случае выхода из строя одного из двигателей внутреннего сгорания или генератора, ГМ могла продолжать движение на втором. Преимущества Char 2С с ЭМТ: высокая проходимость, отсутствие дополнительных механизмов поворота, бесступенчатое изменение скорости. Недостатки Char 2С с ЭМТ: низкая скорость, низкая подвижность, маневренность из-за большой массы машины, аналоговое управление работой электрических машин без обратной связи. Ходовое оборудование танка было сложным в обслуживании и достаточно ненадежным. Большая масса электрических машин.

Tiger (P) (Tigr Порше) — немецкий тяжёлый танк времён Второй мировой войны, созданный Фердинандом Порше и фирмой Porsche.

Основные технические характеристики Tiger (P) [2]:

- габаритные размеры: длина корпуса – 6700 мм, ширина корпуса – 3140 мм, высота – 2800 мм;
- боевая масса – 59 т;
- силовая установка – 2 двигателя Porsche 101/1 V-10 с воздушным охлаждением мощностью 2×310 л. с.;
- максимальная скорость – 35 км/ч (по шоссе);
- запас хода – до 105 км.

Силовой агрегат ГМ состоит из 2 бензиновых ДВС Porsche Type 101 мощностью 320 л. с. и номинальной частотой вращения коленчатого вала 2500 об/мин, которые соединяются с двумя генераторами Тур aGV 275/24 Siemens-Schuckert 500 VA. Ротор генератора является маховиком ДВС. Генераторы питают два тяговых асинхронных электродвигателя Siemens D1495a 230 kW, приводящих в движение ведущие колёса. В ЭМТ танка реализовано последовательное соединение электродвигателей, что обеспечивает курсовую устойчивость при прямолинейном движении и удобство в управлении. Если одна из гусениц будет вращаться с большей скоростью чем другая, то напряжение на электромоторе поднимается, шунтирующая обмотка ослабляет магнитное поле этого электродвигателя, соответственно снижается момент и движение машины выравнивается.

Преимущества Tiger (P) с ЭМТ: высокая проходимость, легкость управления, непрерывность и плавность изменения передаточного отношения при увеличении сопротивления движению, преодолении брода, препятствий и т. д. частота вращения вала электродвигателя уменьшается, но момент при этом возрастает, за счет этого достигается высокая проходимость и хорошие тяговые характеристики. За счет отсутствия механической связи двигателя внутреннего сгорания с ведущими колесами он работает в оптимальном режиме.

Недостатки Tiger (P) с ЭМТ: большая масса ГМ, недостаточная маневренность вследствие низких скоростей движения.

ИС-6 (Объект 253) – прототип советского тяжелого танка времен Второй мировой войны. Основным его отличием от большинства советских танков является ЭМТ (рис. 1).

Основные технические характеристики *ИС-6 (Объект 253)* [3]:

- габаритные размеры: длина корпуса – 5434 мм, ширина корпуса – 3430 мм, высота – 2530 мм;
- боевая масса – 54 т;
- силовая установка – дизельный ДВС В-12V с жидкостным охлаждением, мощностью 750 л. с, при 2100 об/мин;
- максимальная скорость – 35 км/ч (по шоссе);
- запас хода – до 150 км.

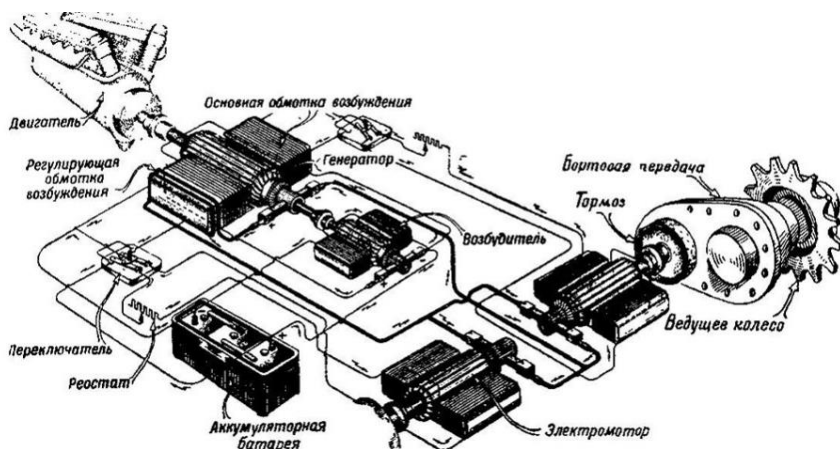


Рисунок 1 – Электромеханическая трансмиссия ИС-6 (Объект 253)

Силовая установка танка – дизельный ДВС В-12V мощностью 750 л. с. при частоте вращения коленчатого вала 2100 об/мин. В ЭМТ танка входит главный генератор (ДК-305А 385 кВт), синхронный трехфазный генератор СГ-1А (необходим для питания вентиляторов системы охлаждения тяговых электродвигателей и ДВС) и два тяговых электродвигателя ДК-302А и ДК-302Б. На ДВС установлены 2 генератора постоянного тока Г-73, для обеспечения питания цепей возбуждения генераторов ДК-305А и СГ-1А. Тяговые электродвигатели ДК-302А и ДК-302Б соединяются с ведущими колесами через бортовые редукторы. Сила тяги изменяется путем изменения возбуждения главного генератора. Напряжение силовой части – 500 В, рабочий ток – до 960 А [4].

Преимущества ИС-6 (Объект 253) с ЭМТ: высокая проходимость, легкость управления, удовлетворительная маневренность, устойчивость при прямолинейном движении, бесступенчатое изменение крутящего момента.

Недостатки ИС-6 (Объект 253) с ЭМТ: большая масса машины и ЭМТ, низкая надежность ЭМТ, перегрев электрических машин (главный генератор и тяговые электродвигатели).

В настоящее время выпускаются следующие гусеничные машины с гибридными ЭМТ: Caterpillar D7E, ДСТ-Урал Е9, ДСТ-Урал Е12, ДЭТ-250, ДЭТ-320, ДЭТ-400, Б11.6300 (ЧТЗ).

Caterpillar D7E – это бульдозер среднего размера с электромеханической трансмиссией, которая обеспечивает высокую эффективность, производительность и управляемость. D7E оснащен дизельным двигателем Cat C9.3 с турбонаддувом, развивающим мощность 268 л. с. (197 кВт).

Основные технические характеристики [5]:

- модель двигателя: Cat C9.3В;
- номинальная мощность: 197 кВт;
- эксплуатационная масса: 29776 кг.

ЭМТ состоит из генератора, соединенного с двигателем, и электродвигателей, приводящих в движение гусеницы. ЭМТ обеспечивает плавное изменение передаточного числа без потери мощности, что приводит к повышению эффективности и производительности. Бульдозер также оснащен системой автоматического управления дроссельной заслонкой, которая оптимизирует расход топлива в зависимости от нагрузки. Система управления ЭМТ обеспечивает

точное управление гусеницами, что позволяет оператору легко маневрировать и точно позиционировать бульдозер.

Бульдозер Е12 ДСТ-Урал с электромеханической трансмиссией – это современная и мощная землеройная машина, предназначенная для выполнения сложных задач в различных отраслях промышленности.

Бульдозер оснащен двигателем ЯМЗ-850 мощностью 520 л. с., что обеспечивает высокое тяговое усилие и производительность. Электромеханическая трансмиссия позволяет плавно регулировать скорость и направление движения, повышая эффективность и снижая износ механизмов, а также обеспечивает оптимальный расход топлива. В состав ЭМТ входят электрические машины синхронного типа на постоянных магнитах.

Основные технические характеристики [6]:

- масса: 50 т;
- емкость отвала: 16 м³;
- максимальная скорость: 15,85 км/ч;
- тяговое усилие: 245 кН.

Преимущества бульдозера Е12: возможность осуществлять разворот на месте, по заявлению производителя имеет расход топлива на 20 % ниже, чем аналог с механической трансмиссией, независимый бесступенчатый привод, отсутствие в ЭМТ рабочей жидкости и элементов трения снижает стоимость обслуживания и увеличивает интервалы проведения обслуживания, оптимальный режим работы двигателя, продлевающий его ресурс.

Трактор ДЭТ-250 – первый трактор в СССР производства Челябинского тракторного завода с ЭМТ. ЭМТ трактора содержит электрические машины постоянного тока, а именно силовой генератор ДК-510Б, тяговый асинхронный электродвигатель ЭДТ-166А а также возбуждатель ДК-913А. За счет ЭМТ реализуется автоматическое изменение усилия на крюке и скорости ГМ в зависимости от действующих внешних нагрузок.

Основные технические характеристики [7]:

- масса: 32,3 т;
- двигатель: В-31М4 (237 кВт);
- максимальная скорость: 15 км/ч;
- тяговое усилие: 245 кН.

К основным преимуществам относятся бесступенчатое изменение скорости без разрыва потока мощности, высокие показатели маневренности, низкий уровень шума и вибрации. Так же присутствуют и недостатки в виде аналогового управления электрическими машинами, также при перегрузках электродвигатели и инверторы нагреваются и требуют дополнительного охлаждения.

Бульдозер Б11.6300Е производства Челябинского тракторного завода является современной высокопроизводительной ГМ, предназначенной для выполнения широкого спектра землеройных и строительных работ. Одной из отличительных особенностей данной модели является применение электромеханической трансмиссии. Трактор оснащен дизельным двигателем мощностью 240 л. с., который приводит в действие генератор переменного тока мощностью 150 кВт. Генератор вырабатывает электроэнергию, которая подается на тяговые электродвигатели 75 кВт каждый, расположенные совместно с планетарными трехступенчатыми бортовыми редукторами на каждом из гусеничных движителей. Управление двигателями осуществляется через электронный блок управления.

Основные технические характеристики [8]:

- масса: 17620 кг;
- двигатель: ЯМЗ-53625 (240 кВт);
- максимальная скорость: 12 км/ч;
- удельный расход топлива: 197 г/л. с. ч.

Преимущества: высокая эффективность (ЭМТ позволяет максимально эффективно использовать мощность двигателя, снижая потери энергии), криволинейное движение с максимальной постоянной тягой, плавное регулирование скорости, повышенная маневренность (возможность независимого управления гусеничными движителями облегчает маневрирование бульдозера в ограниченных пространствах и дает возможность разворота на месте).

Гусеничный трактор «БЕЛАРУС» 1502Э – это совместный проект «ЭТ-160Г» разработки экспериментальной модели ГМ с ЭМТ мощностью 116кВт и тяговым усилием на крюке до 10 тонн ООО «РУСЭЛПРОМ-Электропривод» и ОАО «МТЗ». В качестве базовой модели использовался гусеничный трактор «БЕЛАРУС» 1502 мощностью 116 кВт, разработанный на Минском тракторном заводе, предназначенный для выполнения сельскохозяйственных и промышленных работ. На тракторе применили последовательную схе-

му (рис. 2), при которой двигатель внутреннего сгорания вращает асинхронный электромотор-генератор. Силовая установка содержит также 2 тяговых асинхронных двигателя, которые приводят в движение гусеницы левого и правого борта. Электродвигатели через инверторы питаются от преобразователя постоянного тока, который подключен к электрогенератору. Управление тяговым электроприводом осуществляется векторным способом с идентификацией параметров. Система позволяет оценивать все основные параметры двигателя и контролировать алгоритмы управления приводом в режиме реального времени [9].

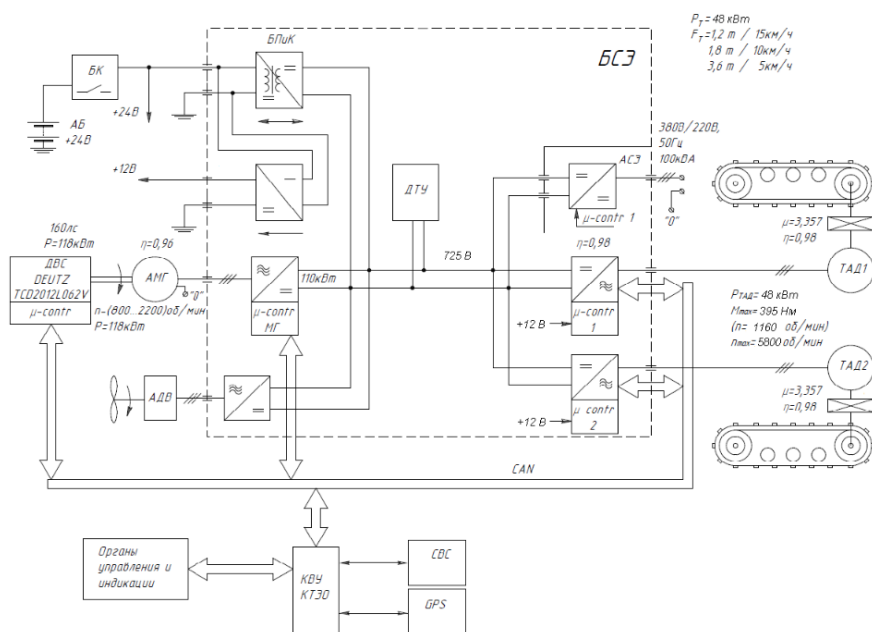


Рисунок 2 – Функциональная схема ЭМТ [9]

Основные технические характеристики трактора:

- двигатель: Д-260.1 S2;
- мощность (номинальная/эксплуатационная): $116 \pm 2 / 111 \pm 2 \text{ кВт}$;
- номинальная частота вращения коленчатого вала: 2100 об/мин;
- эксплуатационная масса: 12760 кН.

К недостаткам прототипа трактора «БЕЛАРУС» 1502Э относится проблема, связанная с совместной работой электрических машин (генератора и электродвигателей), вызывающая скачки напряжения на выходе инверторов и соответственно в преобразователе постоянного тока, что влияет на неточность получаемых параметров что приводит к нарушению алгоритмов управления электродвигателями. Данный недостаток решается разработкой блока управления на базе микроконтроллера и реализацией широтно-импульсной модуляции сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ЭМТ на ГМ может способствовать созданию современной высокопроизводительной машины, предназначенной для выполнения широкого спектра сельскохозяйственных и промышленных работ. Наиболее перспективной является схема с использованием двух тяговых электродвигателей на каждую гусеницу. Это позволит обеспечить плавное и бесступенчатое регулирование скорости движения в различных диапазонах, без разрыва потока мощности, что повысит маневренность, управляемость и эффективность работы. Среди преимуществ использования ЭМТ на ГМ обеспечение оптимального режима работы ДВС при различных нагрузках на трактор, снижение шума и вибрации (ЭМТ работает тише и с меньшей вибрацией, чем традиционные механические трансмиссии), повышение топливной эффективности, снижение выбросов в окружающую среду, отсутствие дополнительных фрикционных механизмов поворота, что упрощает конструкцию, возможность реализации рекуперации энергии, увеличенный срок службы (электрические компоненты имеют более длительный срок службы, чем механические узлы, что снижает эксплуатационные расходы).

Благодаря переходу от аналогового управления к использованию блоков управления на базе процессоров с обратной связью появляется возможность внедрения беспилотного управления трактором. В перспективе переход от использования асинхронных тяговых электродвигателей на электродвигатели синхронного типа (бесщеточные), так как отсутствуют узлы трения, требующие обслуживания и замены в случае износа, более высокий ресурс, большой пусковой момент и перегрузочная способность по моменту, более высокий КПД (80–90 %), меньшие пусковые токи, более просты в об-

служивании. Асинхронные электрические машины имеют низкий КПД на режимах частичной нагрузки.

Среди основных недостатков перед классической тракторной трансмиссией - более высокая стоимость производства и чувствительность к перегрузкам, вызывающая перегрев электрических машин. Последнее решается установкой дополнительных систем контроля температуры электродвигателей, а также использование различных систем охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Char 2С. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Char_2C. – Дата доступа: 15.01.2024

2. Pz.Kpfw. VI Tiger (P). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Pz.Kpfw._VI_Tiger_\(P\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Pz.Kpfw._VI_Tiger_(P)). – Дата доступа: 15.01.2024.

3. ИС-6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%A1-6>. – Дата доступа: 15.01.2024.

4. Тяжелый танк ИС-6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://war-book.ru/tyazhelyj-tank-is-6/>. – Дата доступа: 15.01.2024

5. D7E Обзор. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://h-spec.cat.com/cmms/v2?&f=product&it=product&cid=406&lid=ru&sc=X355&gid=323&pid=1000000223&nc=1#>. – Дата доступа: 15.01.2024

6. Бульдозер (ЭМТ) E12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tdst.by/product/buldozer-emt-e12/>. – Дата доступа: 15.01.2024.

7. Трактор ДЭТ-250. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stroy-technics.ru/article/traktor-det-250>. – Дата доступа: 15.01.2024.

8. ЧТЗ Б11.6300 Бульдозер с электромеханической трансмиссией. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chztz.nt-rt.ru/price/product/1125158>. – Дата доступа: 15.01.2024.

9. Виноградов, А. Б. Особенности реализации тягового электрооборудования гусеничного промышленного трактора мощностью 160 л. с. / Виноградов А. Б., Гнездов Н. Е., Чистосердов В. Л. // Электротехника. – 2017. – № 5. – С. 14–18.