

ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В ГИБРИДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ.

Часть 3. Разработки КТЭО для гибридных транспортных средств в Концерне «РУСЭЛПРОМ»

СТАНИСЛАВ ФЛОРЕНЦЕВ, ген. директор, ООО «Русэлпром-электропривод»,
ДМИТРИЙ ИЗОСИМОВ, зам. ген. директора по науке, ООО «Русэлпром-электропривод»,
ДМИТРИЙ ГАРОНИН, техн. директор, дивизион «Русские автобусы группа ГАЗ»
ИВАН УСС, ген. конструктор, РУП «Минский тракторный завод»,
ЛЕВ МАКАРОВ, ген. конструктор, ООО «Русэлпром»,
АНДРЕЙ ЗАЙЦЕВ, гл. конструктор, ОАО «Русэлпром-НИПТИЭМ»*

ООО «Русэлпром-электропривод» совместно с предприятиями-изготовителями транспортных средств выполнило ряд разработок транспортных средств. Все транспортные средства и КТЭО создавались и создаются на коммерческой основе с заводами-изготовителями транспортной техники; бюджетные средства в рамках инновационных программ не использовались.

1. КТЭО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА КЛАССИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 300 Л.С. С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ ПЕРЕМЕННО- ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ПРИВОДОМ

Концептуальный макет трактора показан на рисунке 1.

Параметры трактора МТ33022Э:

- масса — 11500 кг;
- максимальная скорость — 50 км/ч;
- масса задних навесных орудий — 3500 кг;
- масса передних навесных орудий — 2800 кг;
- радиус качения задних колес — 0,922 м (143 об./мин при 50 км/ч);
- коэффициент редукции заднего ведущего моста — 27,618;
- радиус качения передних колес — 0,706 м (188 об./мин при 50 км/ч);
- коэффициент редукции переднего ведущего моста — 21,2545;
- коробка передач: $K_1=4,824$; $K_2=2,912$; $K_3=1,762$; $K_4=1,063$;
- максимальное усилие на крюке — 54000 Н;
- максимальная мощность дизеля (Detroit Diesel) — 300 л.с. (при 2200 об./мин);

– максимальная мощность мотор-генератора — 225 кВт (1074 Нм при 2000 об./мин).

– максимальная мощность вала отбора мощности (ВОМ) — 190 кВт.

Применение электромеханической трансмиссии позволяет:

- улучшить технико-экономические показатели трактора;
- снизить динамические нагрузки на узлы трактора и дизеля;
- уменьшить буксование колес, снизить расход топлива на единицу выполненной работы (до 30%);
- обеспечить бесступенчатое регулирование скорости агрегата;
- снизить эксплуатационные затраты на техническое обслуживание, ремонт и расходные материалы;
- повысить надежность работы трактора в целом.

Компоновка трактора с электромеханической трансмиссией показана на рисунке 2.

Состав КТЭО:

- тяговый асинхронный мотор-генератор (АМГ) переменного тока с силовым преобразователем (СП) с микропроцессорной частотной системой управления;
- тяговый асинхронный двигатель (ТАД) центрального привода с силовым преобразователем с микропроцессорной частотной системой управления;
- блок питания и коммутации (БПК и ПК);
- DC/DC-преобразователь питания собственных нужд (системы охлаждения);
- тормозной резистор с чоппером (DC/DC-преобразователем);
- контроллер верхнего уровня (КВУ) с органами управления и отображения информации в кабине трактори-

ста для управления потоками мощности и тягой, связанный по CAN со всеми контроллерами СП, дизеля, внешней ПЭВМ, GPS.

Трактор оборудован сервисной вычислительной системой (СВС). Параметры асинхронных двигателей МГ и ТАД указаны в таблице 1.

МГ и ТАД имеют жидкостное охлаждение, расход воды составляет 20 л/мин.

Силовые преобразователи АМГ и ТАД, ПК и DC/DC-преобразователи объединены в блок силовой электроники (БСЭ). Силовые преобразователи выполнены на базе интегральных трехфазных инверторов напряжения SKAI фирмы SEMIKRON, максимальный фазный ток составляет 300 А (эфф., длительно), номинальное напряжение в звене постоянного тока — 850 В. Для управления используются процессорные контроллеры TMS 320 (частотное управление). БСЭ имеет жидкостное охлаждение, расход воды — 10 л/мин.

В настоящее время:

- успешно завершены полигонные испытания КТЭО в составе макета трактора МТ33022Э, включая сопоставительную пахоту;



Рис. 1. Концепт трактора МТ33022Э с электромеханической трансмиссией

*Примечание. В разработке устройств КТЭО и транспортных средств принимали участие сотрудники Концерна «Русэлпром» и предприятий — изготовителей конкретной транспортной техники

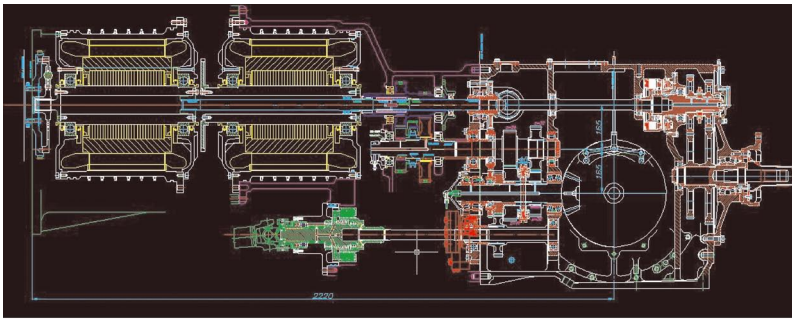


Рис. 2. Компонка макетного образца трактора МТ330223

– по результатам испытаний в 2009 г. выпущена установочная серия (с модернизацией КТЭО) тракторов, проводятся эксплуатационные и сертифициционные испытания на машиноиспытательных станциях РФ и РБ.

2. ОПЫТНАЯ ПАРТИЯ ТРАКТОРОВ МТЗ 3023 С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ ПЕРЕМЕННО-ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ПРИВОДОМ

Параметры трактора МТЗ 3023:

- тип трактора — общего назначения;
- колесная формула — 4x4;
- номинальное усилие на крюке — 50 кН;
- ДВС — Detroit Diesel S40E 8.7 LTA M146;
- мощность ДВС, кВт (л.с.) — 220 (300);
- частота вращения ДВС номинальная — 2200 об./мин;
- максимальный крутящий момент ДВС — 1457 Нм;
- коэффициент запаса крутящего момента — 40%;
- удельный расход топлива при эксплуатационной мощности ДВС — 249 г/(кВт·ч);
- оптимальный расход топлива ДВС — 195 г/(кВт·ч);
- объем топливного бака — 500 л;
- коробка передач — бесступенчатая электромеханическая с электроприводом переменного тока, два механических диапазона, переключение двух ступеней внутри каждого диапазона с помощью фрикционных гидрорегулируемых муфт автоматически или принудительно;
- скорости в диапазонах, км/ч:

- поле — 0...18;
- дорога — 0...42 (50);
- реверс — полный;
- передний ведущий мост — с конечными передачами планетарного типа, с самоблокирующимся дифференциалом;
- задний мост — с дифференциалом с фрикционной муфтой блокировки, конечными передачами планетарного типа;
- габаритные размеры (длина/ширина/высота) — 6400/2630/3250 мм;
- масса, кг:
 - конструкционная 11500;
 - эксплуатационная 12500;
 - максимальная 18000;
- база трактора — 3260 мм;
- шины (основная комплектация, передние/задние) — 540/65R30/580/70R42;
- минимальный радиус поворота — 5,5 м.

В тракторе МТЗ 3023 применены модернизированные узлы КТЭО макетного образца трактора с центральным приводом, включая модернизированные асинхронные электрические машины (МГ и ТАД), блок силовой электроники, блок коммутаций, КВУ и табло. Блок-схема КТЭО приведена на рисунке 3.

В контроллерах МГ и ТАД применена векторная система управления. Компонка тягового оборудования на тракторе и фотография блока силовой электроники (крышка снята) приведены на рисунке 4.

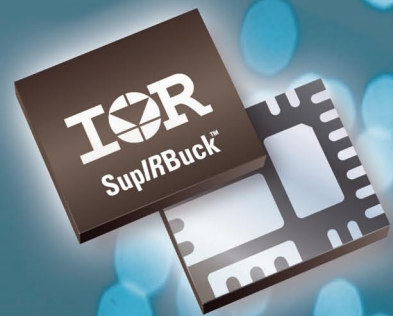
Для обеспечения контроля за различными системами трансмиссии в кабине водителя расположено информационное табло. Оно имеет семь экранов отображения информации и позволяет полностью контролировать работу

Таблица 1. Основные параметры МГ и ТАД

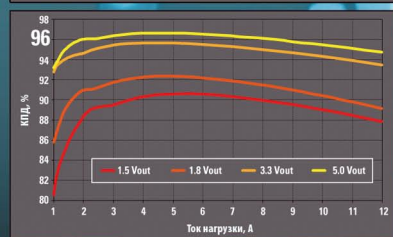
Наименование параметра	МГ, значение	ТАД, значение
Тип	Асинхронный с короткозамкнутым ротором	
Число фаз	3	
Мощность, кВт	220	183
Номинальная частота вращения, об./мин.	1750	1450
Диапазон частот вращения, об./мин.	800—2200	—3600...3600
КПД (совместно с силовым преобразователем)	0,93	
Габариты (длина/диаметр), мм	630/545	
Масса, кг	650	

**ЭКОНОМИЯ ВРЕМЕНИ,
МЕСТА И МОЩНОСТИ
С РЕГУЛЯТОРАМИ**

Gen2 SupIRBuck



Зависимость КПД IR3840 от тока нагрузки (600 кГц, Vin 12 В)



Наимен-е	Диапазон вход. напр-я VIN, В	Диапазон выход. напр-я, В	Вых. ток, А	Частота, кГц
IR3831MPbF	1.5 - 16	0.7 - 0.9*V _{IN}	8	250 - 1500
IR3840MPbF	1.5 - 16	0.7 - 0.9*V _{IN}	12	250 - 1500
IR3841MPbF	1.5 - 16	0.7 - 0.9*V _{IN}	8	250 - 1500
IR3842MPbF	1.5 - 16	0.7 - 0.9*V _{IN}	4	250 - 1500

International
IOR Rectifier
THE POWER MANAGEMENT LEADER

ПЛАТАН
www.platan.ru

Офисы в Москве: м. Молодежная: Москва, ул.Ивана Франко, 40, стр.2, (495) 97-000-99, почта: 121351, Москва, а/я 100, e-mail: platan@aha.ru, м. Новослободская: Москва, 1-й Щемилковский пер., 16, стр. 2, (495) 744-70-70, platan@platan.ru
Офис в Санкт-Петербурге: ул.Зверинская, 44, (812) 232-88-36, 232-23-73, baltika@platan.spb.ru

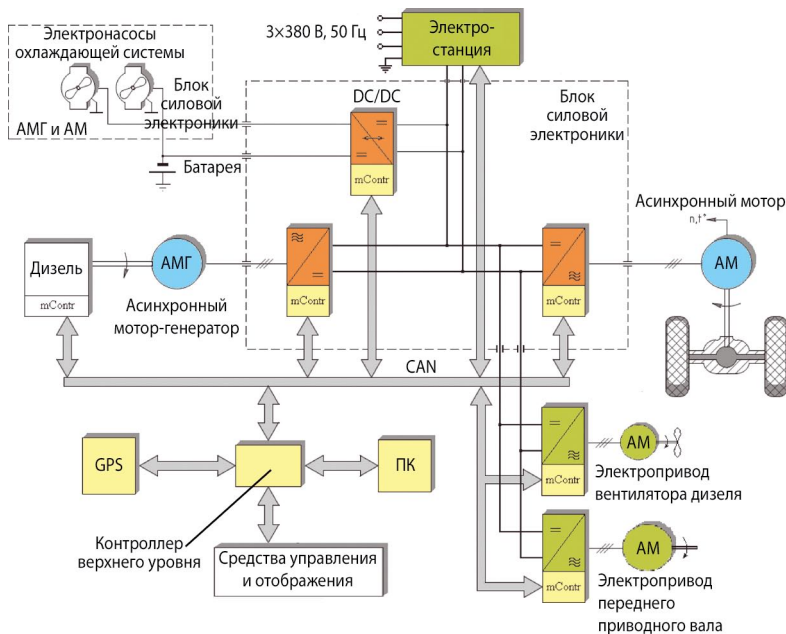


Рис. 3. Блок-схема КТЭО трактора МТЗ 3023

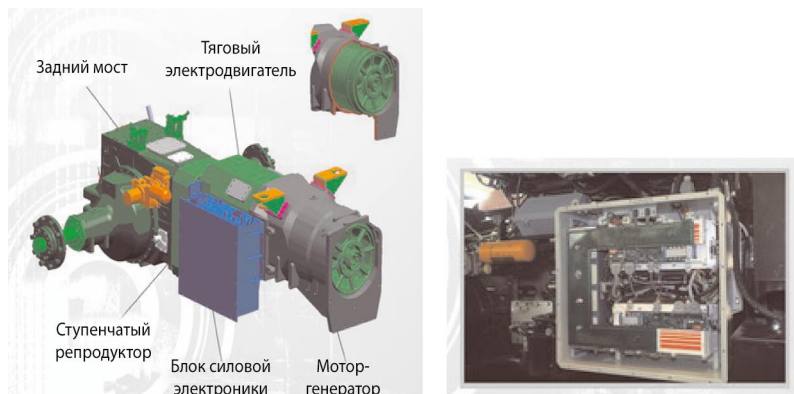


Рис. 4. Компонновка тягового оборудования на тракторе и блок силовой электроники

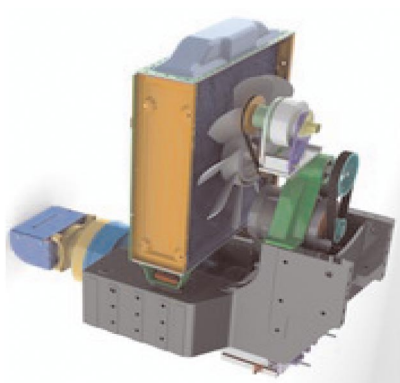


Рис. 5. Привод переднего ВОМ и привод вентилятора с радиатором в сборке на раме трактора МТЗ 3023

электромеханической трансмиссии и двигателя внутреннего сгорания.

Алгоритмы управления позволяют осуществлять функцию реверса в автоматическом режиме. Нажав на кнопку на рукоятке джойстика «Движение», можно перемещаться в одном из двух диапазонов, в зависимости от необходимости максимальной скорости движения: 1 — рабочий (0...18 км/ч) и 2 — транс-

портный (0...42 км/ч). Для простоты агрегатирования трактора с сельхозорудиями заложена функция перемещения с малой скоростью при полном нажатии на педаль акселератора, которая включается кнопкой «Малое перемещение».

С целью обеспечения простоты диагностики и сервиса, упрощения наладки и контроля за параметрами оборудования ООО «Русэлпром-электропривод» разработало сервисную вычислительную систему (СВС) — специальное программное обеспечение для персонального компьютера. СВС служит для задания уставок и настройки параметров системы управления, выборочного отображения текущих значений переменных, сохранения и динамического отображения значений переменных.

ООО «Русэлпром-электропривод», в дополнение к основному оборудованию КТЭО, разработало и поставляет в качестве опций автономную станцию электроснабжения (АСЭ), электропривод переднего вала отбора мощности

(ВОМ), и электропривод вентилятора радиатора.

Основные характеристики АСЭ:

- номинальная частота выходного напряжения — $50 \pm 0,5$ Гц;
- номинальное выходное линейное напряжение 3×400 В (схема без нулевого провода);
- номинальное выходное фазное напряжение 3×220 В (схема с нулевым проводом);
- регулируемая уставка выходного напряжения — 5/—10%;
- коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения — не более 5%;
- номинальная активная выходная мощность — 172,5 кВт;
- КПД при номинальной нагрузке — не менее 95%;
- габаритные размеры $1200 \times 800 \times 300$ мм;
- масса — 85 кг;
- степень защиты — IP65.

Электромеханический привод переднего ВОМ и привод вентилятора показаны на рисунке 5.

Основные характеристики привода ВОМ:

- номинальная мощность — 55 кВт;
- номинальный момент на валу — 105 Нс;
- номинальный ток — 90 А;
- КПД двигателя — не менее 93%;
- срок службы — 10 лет.

Привод переднего ВОМ контейнерного типа позволяет устанавливать его как на трактор, так и на передние навесные орудия.

Наличие на тракторе электрического привода вентилятора системы охлаждения позволяет точно регулировать поток воздуха через радиатор, не допуская перегрева дизеля при его работе в режимах оптимальных по топливной эффективности (при снижении оборотов дизеля) и, при необходимости, включать режим реверса для продувки и очистки радиатора. Максимальная мощность электропривода вентилятора — 20 кВт.

АСЭ, привод ВОМ и привод вентилятора питаются от звена постоянного тока блока силовой электроники с помощью управляемых силовых преобразователей (инверторов).

Преимущества, достигнутые в тракторе с КТЭО:

- эффективная, простая и надежная бесступенчатая коробка передач;
- всего два режима, выбираемых вручную (поле или дорога);
- автоматическое переключение фрикционной муфтой, обеспечивающей эффективный разгон на транспорте;
- возможность работы с высоким КПД во всем диапазоне скоростей движения;

Таблица 2. Сравнительные показатели трансмиссий в сельскохозяйственных тракторах

Характеристика	Электромеханическая	Гидромеханическая	Гидрообъемная
Экономичность	КПД до 90%, который в малой степени зависит от скорости движения и нагрузки	КПД около 80% и в большой степени зависит от скорости движения и нагрузки	КПД около 80%, который в малой степени зависит от скорости движения и нагрузки
Техническое обслуживание	Обслуживание минимально (контроль охлаждающей жидкости, сопротивления утечки и пр.)	Замена масла и фильтров. Загрязнение масла критично	Замена масла и фильтров. Загрязнение масла критично
Чувствительность к окружающей температуре	Прогрев не требуется. Контроль за перегревом электрических машин и силовой электроники при повышенной температуре	При качественном масле перегрев не опасен. Требуется прогрев, возможна аварийная ситуация	При качественном масле перегрев не опасен. Требуется прогрев, возможна аварийная ситуация
Ремонтпригодность	Ремонт только быстрой заменой блоков, без разборки узлов. Стоимость определяется стоимостью заменяемых блоков	Ремонт возможен с разборкой узлов.	Ремонт только заменой блоков. Быстрый, но несколько дешевле, чем в случае с электромеханикой
Совместная работа с дизелем (ДВС)	ДВС при всех нагрузках и скоростях работает в оптимальном режиме, что экономит топливо	С изменением нагрузки и скорости изменяется нагрузка на ДВС	ДВС при всех нагрузках и скоростях работает в оптимальном режиме, что экономит топливо
Опасные факторы	Высокое напряжение в закрытых электрических машинах и силовой электронике	Не отмечено	Высокое давление жидкости — 400 атм.
Оптимальность тяговой характеристики	Оптимальна для любых машин из-за реализации регулирования и стабилизации момента и скорости	Для сельскохозяйственных тракторов не оптимальна: скорость движения зависит от нагрузки	Оптимальна для любых машин, возможна работа в автоматическом режиме и с фиксированным передаточным числом
Компоновка	Свободная компоновка приводных машин дает хорошую развесовку	Жесткая связь между узлами ограничивает свободу компоновки	Свободная компоновка приводных машин дает хорошую развесовку
Степень готовности	Разработка, опытная эксплуатация.	Серийное производство	Серийное производство компонентов
Ориентировочная стоимость	Электротрансмиссия дороже гидромеханической и примерно на 10% дороже гидрообъемной. С уменьшением цен на силовую и управляющую электронику цена сравняется, а, возможно, станет меньше. Малые эксплуатационные затраты	Наиболее дешевая в условиях крупносерийного производства. Значительные эксплуатационные затраты	Трансмиссия дороже гидромеханической примерно на 20%. Значительные эксплуатационные затраты

– эффективное управление режимами работы дизеля, в зависимости от потребляемой мощности;

– режимы электроторможения с передачей энергии движения в дизель;

– система удержания трактора на подъеме и спуске;

– возможность точного перемещения на заданное малое расстояние.

– эффективное водяное охлаждение электропривода.

– дополнительные опции: электропривод вентилятора ДВС; электропривод переднего ВОМ; автономная станция электроснабжения.

Преимущества с точки зрения комфорта и удобства управления движением:

– простота и удобство органов управления коробкой передач;

– наличие нескольких режимов управления трансмиссией:

– задание скорости движения от педали;

– задание скорости движения от джойстика с возможностью грубой и точной настройки;

– удержание трактора на месте с возможностью управлять в этом режиме оборотами дизеля от педали;

– точное поддержание скорости трактора благодаря GPS;

– возможность автоматического и принудительного управления оборотами дизеля при работе с ВОМ;

– легкость изменения направления движения.

Опытная партия тракторов МТЗ 3023 (5 шт.) прошла испытания на машиноиспытательных станциях в России, Белоруссии и Украине. Широкому потребителю трактор МТЗ 3023 был представлен на крупнейшей сельскохозяйственной выставке AGRITECHNICA-2009,

которая состоялась в Ганновере 8—14 ноября 2009 г. Трактор был удостоен серебряной медали организатора этого показа — немецкого сельскохозяйственного общества DLG.

НЕКОТОРЫЕ ПЛАНЫ РАЗВИТИЯ ТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ С КТЭО

Разработки тракторов с электромеханической трансмиссией в РУП МТЗ не ограничиваются моделью трактора с дизельным двигателем мощностью 300 л.с. — достаточно упомянуть ведущие в настоящее время работы по колесным и гусеничным сельскохозяйственным и промышленным тракторам мощностью 150, 160, 450 л.с.

В Минпромторге РФ имеется важнейший инновационный проект «Трактор», предусматривающий создание колесных сельскохозяйственных тракторов классической компоновки классов 5—7 с автоматической трансмиссией. Концерн «Русэлпром» готов выступить контрагентом у российских тракторных заводов при реализации этого проекта в части разработки, изготовления и испытаний опытных образцов, серийного производства полного комплекта тягового электрооборудования для автоматической электромеханической трансмиссии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение электрической трансмиссии в тракторах имеет много преимуществ. Особенно это касается мощных, энергонасыщенных тракторов. В такой технике обычная механическая трансмиссия сложна и дорога, особенно в производстве — достаточно упомянуть только стоимость коробок передач, число которых в мощных тракторах доходит до нескольких десятков.

Электромеханическая трансмиссия полностью решает эту проблему за счет всего двух режимов работы (двух передач) — рабочего и транспортного. Немаловажным обстоятельством для тракторных заводов является получение комплекта устройств КТЭО в качестве комплектующих, что существенно упрощает производственный и сборочный процесс.

Альтернативой электромеханической трансмиссии является гидравлическая (различных типов). Однако следует отметить, что гидротрансмиссия требует при изготовлении точной механической обработки (что недешево и нелегко осваивается на отечественных предприятиях); требуется высококачественное масло и жесткая процедура проведения технического обслуживания (что также непросто реализовать); КПД гидротрансмиссии ниже, чем электромеханической; наконец, ресурс работы гидротрансмиссии невелик. В таблице 2 приведены сравнительные показатели трансмиссий, применяемых в сельскохозяйственных тракторах. В совокупности, все эти факторы однозначно свидетельствуют в пользу применения в тракторах более простой конструктивно, более надежной, не требующей больших эксплуатационных затрат, имеющей больший ресурс, и, следовательно, более перспективной электромеханической трансмиссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stanislav N. Florentsev. *Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles//Proceedings of International Exhibition & Conference Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality (PCIM-2009). 12—14 May 2009. Nuremberg. Germany. P. 625—627.*