

УДК 629.113, 114,115

**Флоренцев Станислав Николаевич**, канд. техн. наук, генеральный директор  
 ООО «Русэлпром – Электропривод», Нижегородская 32/15. Москва, Россия. 109029. тел. +7-499-559-99-07.  
 E-mail: [florentsev@ruselprom.ru](mailto:florentsev@ruselprom.ru)

### МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ

*Рассматривается комплексный подход проектирования всех частей комплекта тягового электрооборудования (КТЭО) для электромеханических трансмиссий различных транспортных средств - генераторов, тяговых двигателей, силовой и управляющей электроники. Проектирование проводится для реализации тягово-динамических требований к транспортному средству с обеспечением оптимальности проектируемых компонентов по критериям минимума габаритов, массы и цены, максимума КПД, с учетом ограничений со стороны силовой электроники, ДВС, остальных частей трансмиссии транспортного средства. Приводятся примеры реализации КТЭО различных транспортных средств, созданных в концерне РУСЭЛПРОМ.*

**Ключевые слова:** тяговый электропривод, силовые преобразователи, генераторы, тяговые двигатели.

**Florentsev Stanislav Nikolaevich**, Cand. Sc. (Eng.), director general  
 LTD "Ruselprom-Elektroprivod", Nizhegorodskaya st., 32/15. Moskva, Russiya. 109029. тел. +7-499-559-99-07.  
 E-mail: [florentsev@ruselprom.ru](mailto:florentsev@ruselprom.ru)

### DESIGN TECHNIQUE HAULING ELECTRICAL EQUIPMENT FOR ELECTROMECHANICS TRANSMISSIONS

*The comprehensive approach of design of all parts of a set of traction electric equipment (STEE) for electromechanical transmissions of various vehicles - generators, traction engines, power and control electronics is considered. Design is carried out for implementation of traction and dynamic requirements to a vehicle with providing an optimality of projected components by criteria of a minimum of dimensions, masses and the prices, an efficiency maximum, taking into account restrictions from power electronics, ICE, other parts of transmission of a vehicle. Examples of realization of STEE of the various vehicles created in concern Ruselprom are given.*

**Keywords:** traction electric drive, power converters, generators, traction motors.

#### Постановка проблемы

В транспортных средствах большой грузоподъемности, например, в большегрузных карьерных самосвалах, дизель-электрических локомотивах, в которых использование механической трансмиссии затруднено или даже невозможно, электромеханическая трансмиссия (ЭМТ) применяется давно, и в настоящее время вопрос заключается в ее модернизации. В последние годы в связи с бурным развитием электромашиностроения, силовой и управляющей электроники, внедрение ЭМТ стало экономически и технически выгодным для транспортных средств мощностью от 150 л. с. Таким образом, происходит процесс «генетической мутации» транспортных средств, качественного изменения их структуры и состава основных силовых устройств.

Использование электромеханической трансмиссии в зоне меньших мощностей (150–500 л. с.) в автомобильной, лесной, дорожно-строительной и сельскохозяйственной технике позволяет снизить расход топлива, снизить динамические нагрузки на узлы транспортного средства и ДВС, обеспечить бесступенчатое регулирование скорости без перерыва потока мощности, улучшить технико-экономические показатели, снизить эксплуатационные затраты на обслуживание, ремонт и расходные материалы, повысить надежность и долговременность работы.

Электромеханические устройства являются относительно новыми в транспортной технике, принципы их проектирования с учетом специфики применения пока не устоялись, требуется переосмысливание многих принципиальных моментов. Переход от исходных данных транспортного средства к параметрам конкретных устройств электромеханической трансмиссии в настоящее время основывается на опыте разработок этих устройств для других применений, и представляется скорее искусством проектировщиков. В самом деле, отсутствуют общепринятые и обоснованные процедуры выбора основных параметров электромеханических устройств для транспортной техники с ЭМТ: коэффициентов редукции,

числа передач, частот вращения, частот питания электрических машин, числа пар полюсов, и т. д., и т. п., не говоря уже о выборе типа электродвигателей. Весьма редки случаи корректного сопоставления разработанных систем, тем более что отсутствуют объективные критерии качества их проектирования. Все это в значительной мере сдерживает разработку перспективных образцов транспортной техники с ЭМТ, затрудняет взаимопонимание специалистов – разработчиков электроприводов, механических устройств, систем управления и специалистов – транспортников.

Тяговый электропривод является одним из основных узлов ЭМТ, его характеристики во многом определяют характеристики транспортного средства в целом. Развитие тягового электропривода проходит по пути достижения предельно высоких технико-экономических требований для достижения минимума габаритов, массы и цены, максимума КПД, с учетом ограничений со стороны силовой электроники, ДВС, остальных частей трансмиссии транспортного средства. Можно с полным основанием утверждать, что в тяговом электроприводе в настоящее время реализуется комплекс современных, последних достижений в области электромеханики, силовой и управляющей электроники, систем автоматического управления.

### Основная часть

В компании «Русэлпром–Электропривод» при создании нескольких поколений комплектного тягово-электрооборудования (КТЭО) электромеханических трансмиссий был разработан комплексный подход проектирования всех компонентов тягового электрооборудования, учитывающий параметры транспортного средства, ограничения со стороны ДВС, силовой электроники, обеспечивающий достижение оптимальных характеристик компонентов КТЭО по массе, габаритам, КПД, цене, с учетом технологических ограничений промышленного производства. Условно проектирование КТЭО состоит из следующих этапов:

- анализ технических требований к транспортному средству, моделирование транспортного средства с учетом режимов его работы, параметров движения, проведение тягово-динамических расчетов;
- моделирование КТЭО с учетом результатов по предыдущему этапу, определение требований ко всем компонентам КТЭО;
- проектирование компонентов КТЭО, для реализации требований, полученных на предыдущем этапе;

На этом этапе проектирование проводится не для отдельного компонента КТЭО (генератора, двигателя, силовых преобразователей), а комплексно. Например, генератор проектируется с учетом параметров и ограничений со стороны ДВС и силового преобразователя (ограничения по моментам, скоростям, напряжениям, токам и частотам коммутации). Этот этап является итерационным, с перебором нескольких вариантов реализации параметров отдельных компонентов для достижения оптимального по массе, габаритам, цене, эффективности параметров каждого компонента с учетом технологических ограничений промышленного производства. Таким же образом проектируется и тяговый двигатель, вместе с силовым преобразователем и механической частью трансмиссии до ведущего моста (колеса).

Следует отметить, что для получения предельных параметров электрических тяговых машин нами разработана методика проектирования и многокритериальной оптимизации активных частей асинхронных двигателей. По нашему мнению тяговый асинхронный двигатель с его силовым преобразователем, специально спроектированные под конкретный тип транспортного средства являются лучшим решением по критериям масса, габариты, КПД и цена. В связи с тем, что параметры тяговых асинхронных двигателей зависят от режимов его работы в составе транспортного средства нами разработана методика экспериментального определения параметров асинхронных двигателей, которые используются для обеспечения высокого качества устойчивого регулирования в широком диапазоне скоростей и режимов движения транспортного средства с ЭМТ.

– проектирование вспомогательных систем питания и охлаждения по результатам требований, полученных на предыдущем этапе;

– моделирование транспортного средства с учетом спроектированных компонентов КТЭО, синтез алгоритмов управления транспортным средством для реализации оптимальных режимов движения, работы ДВС в режиме максимальной топливной эффективности.

Для гибридных транспортных средств определяются параметры и тип накопителя энергии, алгоритмы управления потоками мощности в КТЭО ЭМТ.

– определение структуры управления транспортным средством для реализации алгоритмов управления, синтезированных на предыдущем этапе проектирования, определение типов и протоколов связи между компонентами КТЭО и другими частями транспортного средства (органами управления, ДВС, АБС, ЕБС, и т. п.);

– изготовление всех спроектированных компонентов КТЭО, автономные и комплексные отладки и испытания КТЭО на испытательном стенде с имитацией всех режимов движения транспортного средства (текущих, предельных, статических, динамических).

Естественно, что значительная часть разработок унифицирована. Используются разработанные и проверенные алгоритмы и программы векторного и частотной управления в силовых преобразователях тяговых электрических машин, протоколы обмена между компонентами КТЭО, алгоритмы управления ДВС. Фактически на сегодняшний день спроектировано 8 типов тяговых электрических машин, которые в транспортных средствах мощностью 150–500 л. с. с ЭМТ по схеме с центральным приводом (на ведущий мост, мосты) и по схеме мотор - колес.

Примерами КТЭО для ЭМТ по схеме с центральным приводом могут служить КТЭО сельскохозяйственного колесного трактора мощностью 300 л. с. (функциональная схема приведена на рис. 1) и гибридного автобуса (функциональная схема приведена на рис. 2).

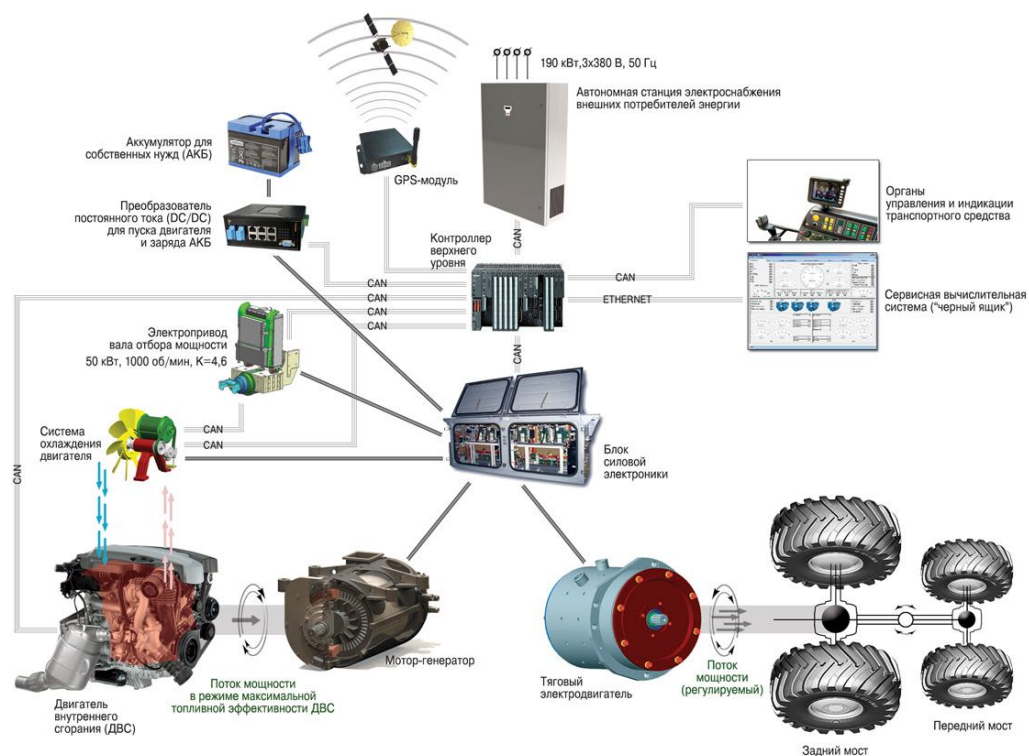


Рис. 1. Функциональная схема

Трактор Беларус-3023 с ЭМТ получил серебряную медаль на выставке Агритехника-2009 в Ганновере и при полевых испытаниях показал повышение производительности на 20 % и экономию топлива на пахоте более 25 %. Гибридный автобус с ЭМТ показал 40 % экономию топлива в городском цикле движения (НАМИ2).

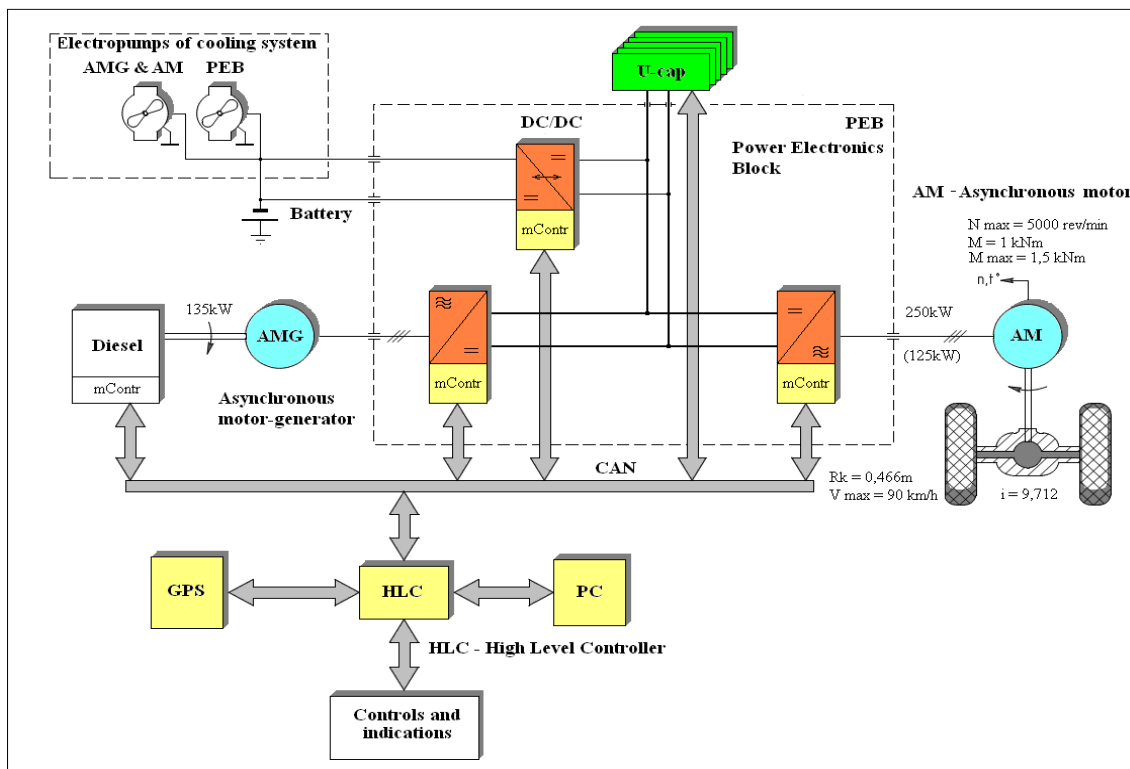


Рис. 2. Функциональная схема

Примерами КТЭО для ЭМТ по схеме мотор – колес могут служить КТЭО для большегрузных карьерных самосвалов, фронтальных погрузчиков, многосных тягачей повышенной проходимости и грузоподъемности, гусеничных сельскохозяйственных и лесных тракторов, колесных тракторов мощностью 450–500 л. с. Схема КТЭО для таких тракторов приведена на рис. 3.

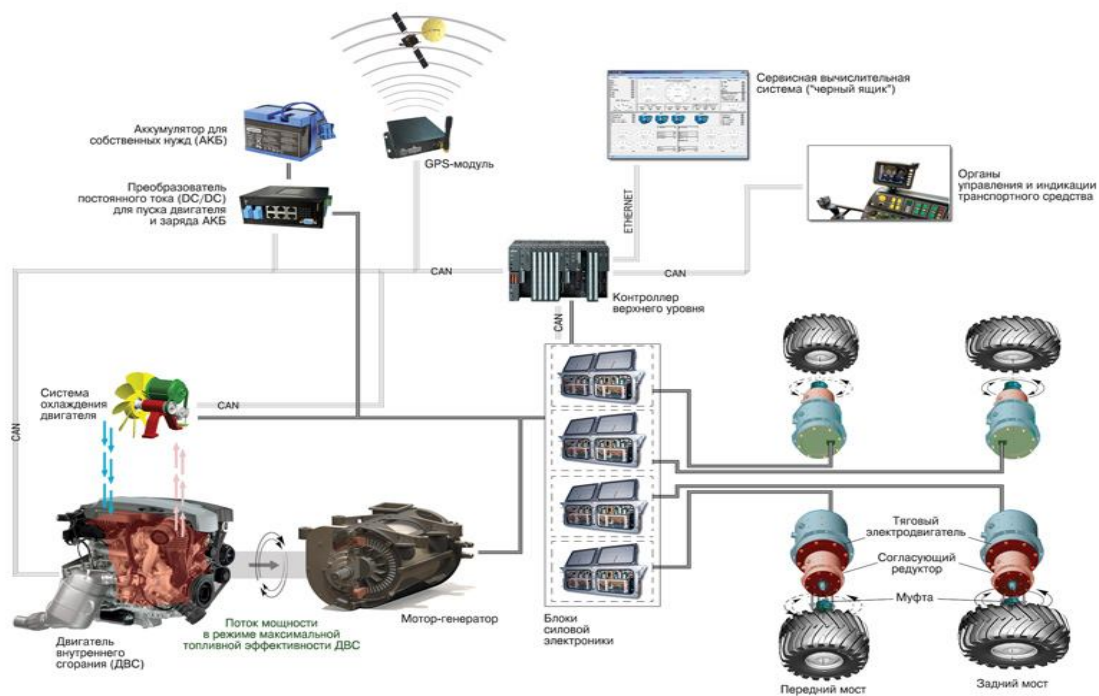


Рис. 3. Схема КТЭО для тракторов

В такой ЭМТ суммарный КПД от вала ДВС до колес составляет более 82 % практически во всем диапазоне скоростей и режимов движения.

Комплексный подход и оптимизация электромеханических устройств позволил существенно улучшить показатели транспортных средств, в ряде случаев – до качественного улучшения их параметров по управляемости, проходимости и достижения требуемых эксплуатационных характеристик.



Колесный трактор 150 л.с.



Колесный трактор 300 л.с.



Колесный трактор 455 л.с.



Гусеничный с/х трактор 160 л.с.



Гусеничный лесной трактор 150 л.с



Фронтальный погрузчик 300 л.с.



Гибридные 12м автобусы

Рис. 4. Примеры транспортных средств с ЭМТ

**Список литературы**

1. S. Florentsev, A.Pukhovoy, I. Uss, D. Izosimov, L. Makarov. Agricultural tractor with pure electromechanical drivetrain. Proceedings 6th International commercial powertrain conference. May 25-26, 2011. Helmut-List-Halle. Graz, Austria. ICPC 2011–3.3. P. 113–120.
2. Stanislav Florentsev, Dmitry Izosimov, Sergey Bayda, Alexander Belousov, Valery Chistoserdov, Vladimir Orlov, Ivan Uss, Michail Meleshko. Estimation of results and potential of electromechanical drivetrain in agricultural tractors. Proceedings 7th International commercial powertrain conference. May 22-23, 2013. Helmut-List-Halle. Graz, Austria. ICPC 2013 – 2.8. P. 93-103.
3. S. Florentsev, D. Izosimov, S. Baida, A. Belousov, A. Sibirtsev, S. Zhuravljov. Complete traction electric equipment sets for hybric buses. APAC16. 16th Asia Pacific Automotive Engineering Conference. October 6-8, 2011, Chennai. India. Paper No. M2010003.
4. S. Florentsev, A.Pukhovoy, I. Uss, D. Izosimov, L. Makarov. Agricultural tractor with pure electromechanical drivetrain. SAE 2011 Commercial Vehicle Engineering Congress. September 13–14. 2011. Rosemont. Illinois USA. Session CV707. Paper No. 2011-01-2296.
5. S. Florentsev, D. Izosimov, I. Ksenevich. Design Philosophy of Complete Traction Electric Equipment Sets For Hybrid Vehicles. SAE International. Publ. No. 2011-24-0001. Copyright © 2011 SAE International doi:10.4271/2011-24-0001/.

**References**

1. S. Florentsev, A.Pukhovoy, I. Uss, D. Izosimov, L. Makarov. Agricultural tractor with pure electromechanical drivetrain. Proceedings 6th International commercial powertrain conference. May 25-26, 2011. Helmut-List-Halle. Graz, Austria. ICPC 2011–3.3. P. 113–120.
2. Stanislav Florentsev, Dmitry Izosimov, Sergey Bayda, Alexander Belousov, Valery Chistoserdov, Vladimir Orlov, Ivan Uss, Michail Meleshko. Estimation of results and potential of electromechanical drivetrain in agricultural tractors. Proceedings 7th International commercial powertrain conference. May 22-23, 2013. Helmut-List-Halle. Graz, Austria. ICPC 2013 – 2.8. P. 93-103.
3. S. Florentsev, D. Izosimov, S. Baida, A. Belousov, A. Sibirtsev, S. Zhuravljov. Complete traction electric equipment sets for hybric buses. APAC16. 16th Asia Pacific Automotive Engineering Conference. October 6-8, 2011, Chennai. India. Paper No. M2010003.
4. S. Florentsev, A.Pukhovoy, I. Uss, D. Izosimov, L. Makarov. Agricultural tractor with pure electromechanical drivetrain. SAE 2011 Commercial Vehicle Engineering Congress. September 13–14. 2011. Rosemont. Illinois USA. Session CV707. Paper No. 2011-01-2296.
5. S. Florentsev, D. Izosimov, I. Ksenevich. Design Philosophy of Complete Traction Electric Equipment Sets For Hybrid Vehicles. SAE International. Publ. No. 2011-24-0001. Copyright © 2011 SAE International doi:10.4271/2011-24-0001/.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.