

**Г. И. Гедроить, С. В. Занемонский**

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
г. Минск, Республика Беларусь  
E-mail: zanemanoff@mail.ru*

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАКТОРОВ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ**

*Аннотация.* В статье дана оценка перспектив применения различных решений по совершенствованию электромеханических и электрических трансмиссий тракторов.

*Ключевые слова:* трактор, трансмиссия, генератор, электродвигатель аккумуляторная батарея, эффективность, производительность.

**G. I. Gedroit, S. U. Zaniamonski**

*EI “Belarusian State Agrarian Technical University”  
Minsk, Republic of Belarus  
E-mail: zanemanoff@mail.ru*

## **PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF TRACTORS WITH ELECTROMECHANICAL AND ELECTRIC TRANSMISSIONS**

*Abstract.* The article assesses the prospects for using various solutions to improve electromechanical and electric transmissions of tractors.

*Keywords:* tractor, transmission, generator, electric motor, battery, efficiency, productivity.

### **Введение**

Одним из путей обеспечения продовольственной безопасности Республики Беларусь является внедрение энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий производства сельскохозяйственной продукции. Решение этой задачи непосредственно связано с повышением производительности машинно-тракторных агрегатов (МТА), совершенствованием конструкции тракторов. Важное место занимают вопросы обоснования параметров трансмиссии колесных и гусеничных машин, их компоновки, эффективности использования. Этими проблемами в разные годы занимались Д. А. Чудаков, В. В. Гуськов, В. А. Скотников, П. И. Бойков, В. В. Кацыгин, Г. С. Горин, И. П. Ксеневиц, В. М. Шарипов, П. А. Амельченко, В. П. Тарасик и др.

### **Основная часть**

На большинстве маломощных сельскохозяйственных тракторов применяют ступенчатые механические трансмиссии. Это связано с тем, что они являются наиболее простыми и надежными в работе, имеют высокий КПД, сравнительно невысокую стоимость, доступны в обслуживании. Основным их недостатком является ступенчатое регулирование крутящего момента и скорости движения, что довольно часто приводит к неэффективному использованию мощности двигателя [1]. В то же время при разветвленной механической трансмиссии с большим количеством передач КПД ее падает, растет стоимость [2].

Основными достоинствами гидрообъемных трансмиссий являются бесступенчатое регулирование крутящего момента в широком диапазоне и плавная передача его на ведущие колеса, сравнительная простота подвода мощности к ведущим колесам трактора, легкость и простота управления. Основные недостатки гидрообъемных трансмиссий – более низкий в сравнении с механическими трансмиссиями КПД, высокая стоимость изготовления [1].

Электромеханическая трансмиссия является бесступенчатой. Крутящий момент двигателя передается к ведущим колесам трактора с помощью электрической энергии. Электропривод, в отличие от гидропривода, не требует специальных масел, фильтров, прогрева при низких температурах, обладает высокой надежностью. Электропривод имеет высокий КПД в широком диапазоне регулирования. Это делает работу трактора эффективной на различных режимах, требует минимального технического обслуживания.

На ОАО «Минский тракторный завод» создан трактор с электромеханической трансмиссией переменного тока. Схема электромеханической трансмиссии трактора «БЕЛАРУС 3023» представлена на рис. 1 [3].

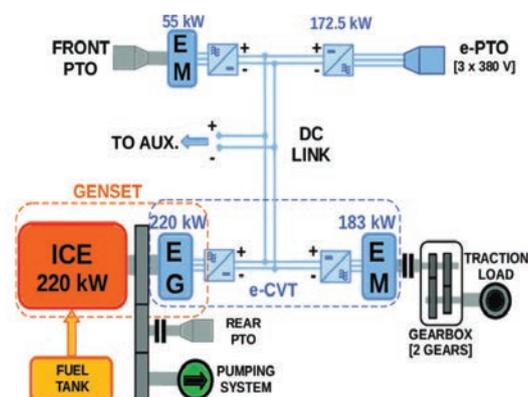


Рис. 1. Схема электромеханической трансмиссии трактора «БЕЛАРУС 3023»

Были проведены сравнительные испытания трактора «БЕЛАРУС 3023» с электромеханической трансмиссией и серийного трактора «БЕЛАРУС 3022ДВ» с переключением передач под нагрузкой гидropоджимными муфтами (табл. 1) [4].

Таблица 1. Результаты сравнительных испытаний тракторов на вспашке

Характеристика	«БЕЛАРУС 3023»	«БЕЛАРУС 3022ДВ»
Условия проведения испытаний		
Типоразмер шин: заднего моста	580/70R42	
переднего ведущего моста	580/70R30	
Эксплуатационная масса трактора, кг	12 440	11 385
Марка плуга	ВВ-100-8	
Вид работы	Вспашка пласта многолетних трав	
Тип почвы, механический состав	Дерново-подзолистая, легкий суглинок	
Рельеф	Ровный, с уклоном 2 %	
Влажность почвы, % по слоям, мм:		
0–100	23,9	
100–200	26,8	
Длина гона, м	870	
Результаты испытаний		
Средняя глубина вспашки, м	0,224	0,225
Средняя ширина захвата, м	3,47	
Средняя рабочая скорость, км/ч	9,37	8,34
Производительность за 1 час основного времени, га/ч	3,25	2,89
Часовой расход топлива, кг/ч	31,7	38,2
Гектарный расход топлива, кг/га	10,81	13,20

Благодаря системе управления двигателем и бесступенчатому регулированию скорости трактора производительность пахотного агрегата на базе трактора «БЕЛАРУС 3023» на 12,5 % выше, чем у агрегата на базе трактора «БЕЛАРУС 3022ДВ» при меньшем на 18 % расходе топлива [4].

На ОАО «МТЗ» продолжаются работы по созданию тракторов мощностью 300 и 350 л. с. с электромеханическими трансмиссиями. Это направление считается перспективным. В планах – расширение применения трансмиссий подобного типа на тракторы меньшей мощности. Испытания показывают, что тракторы с электромеханической трансмиссией имеют преимущества в сравнении с тракторами с механической трансмиссией [5]:

- обеспечивается широкий диапазон агротехнических скоростей МТА, повышается их производительность путем оптимизации технологических скоростей;
- снижается расход топлива в связи с работой двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в экономичном режиме;
- снижается уровень вредных выбросов ДВС;
- увеличивается ресурс двигателя и трансмиссии благодаря исключению передачи динамических нагрузок от ходовой системы на ДВС и уменьшению неравномерности крутящего момента от ДВС к узлам ходовой системы;
- возможно отбирать всю мощность двигателя через электрическую ветвь на любых режимах и скоростях. Это создает предпосылки к созданию и использованию навесных агрегатов и вала отбора мощности (ВОМ) с электроприводом;
- трактор может применяться в качестве передвижной электростанции.

В рамках создания инновационной продукции ОАО «МТЗ» совместно с Национальной академией наук Беларуси разработан экспериментальный образец автономного беспилотного трактора «БЕЛАРУС-А3523i» с электромеханической трансмиссией (рис. 2). Проведены испытания при работе трактора с плугом, культиватором и косилкой. Ведутся работы по совершенствованию технологии машинного зрения, установке цифровых камер и развитию искусственного интеллекта, что позволит трактору самостоятельно избегать столкновения с препятствиями (дорожными столбами, животными), выбирать оптимальный маршрут движения по полю.



Рис. 2. Автономный беспилотный трактор «БЕЛАРУС-А3523i» с электромеханической трансмиссией

После многих лет исследований, разработок и испытаний компания John Deere (США) представила на выставке Agritechnica 2019 первую двухпоточную бесступенчатую трансмиссию eAutoPowr с электромеханическим разделением мощности (рис. 3) [5]. Выпуск серийного трактора запланирован на четвертый квартал 2023 г.

В трансмиссии eAutoPowr гидравлические компоненты полностью заменены электроприводом. John Deere констатирует более высокую эффективность в сравнении с другими трансмиссиями, имеющими деление потока мощности. Упростилась конструкция коробки передач и появилась возможность проводить дистанционную техническую диагностику в режиме реального времени. Коробка передач обеспечивает максимальную скорость движения при пониженной частоте вращения двигателя: 40 км/ч при 1290 мин<sup>-1</sup> и 50 км/ч при 1620 мин<sup>-1</sup>, благодаря чему снижаются энергозатраты при транспортных и других работах [6].

Электропривод также может обеспечивать питание внешних потребителей переменным трехфазным током напряжением 480 В и мощностью до 100 кВт через высоковольтный АЕФ-разъем 4-го поколения.

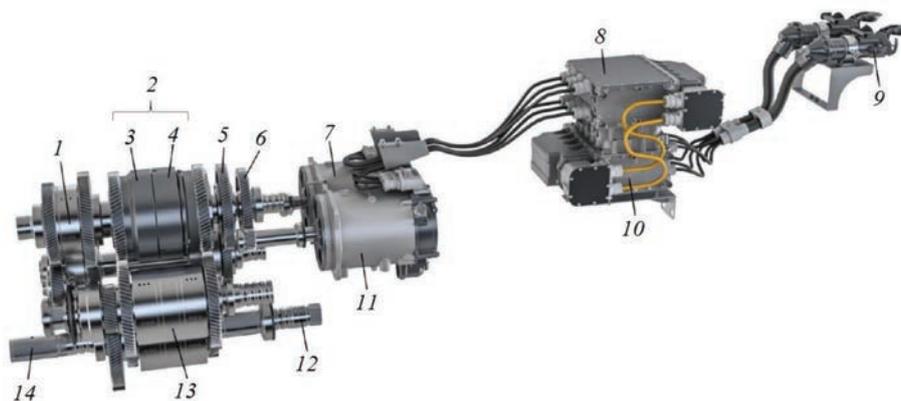


Рис. 3. Двухшочная бесступенчатая электромеханическая трансмиссия eAutoPowr тракторов John Deere серий 8R, 8RT и 8RX: 1 – гидроджимная муфта; 2 – двойной планетарный редуктор повышенных и пониженных передач «HI-LO»; 3 – редуктор повышенных передач «HI»; 4 – редуктор пониженных передач «LO»; 5 – промежуточная передача от двигателя к электрогенератору M1 7; 6 – промежуточная передача от электродвигателя M2 11 к двойному планетарному редуктору 2; 7 – электрогенератор M1, 8 – двойной инвертор электрогенератора M1 7 и электродвигателя M2 11; 9 – АЕF-разъем для подключения внешних потребителей; 10 – двойной инвертор для внешних потребителей; 11 – электродвигатель M2; 12 – выходной вал привода заднего ведущего моста; 13 – двойная гидроджимная муфта повышенных и пониженных передач, 14 – выходной вал привода переднего ведущего моста

Преимущества электромеханической трансмиссии проявляются при создании машин с активным приводом колес. Компании John Deere и Joskin (Бельгия) создали трехосную машину для внесения жидких органических удобрений с двумя осями, оборудованными электроприводом (рис. 4, а). Благодаря системе полного привода возможна более эффективная реализация тягового усилия. Испытания продемонстрировали снижение затрат на внесение жидкого навоза до 25 %. Электропривод осей позволяет уменьшить проскальзывание и буксование, улучшить управляемость в сложных условиях [7].



Рис. 4. Сельскохозяйственные прицепы и цистерны с активными осями с электроприводом: а – полевые испытания трактора John Deere 8R 410 с цистерной Joskin, оборудованной двумя задними осями с электроприводом, на внесении жидких органических удобрений; б – привод осей прицепов и цистерн фирмы Joskin; в – привод осей прицепов «Power Drive Elect» фирмы Fliegl (Германия)

Применение активных приводных осей прицепов является эффективным способом повышения проходимости МТА с прицепами [8]. Механический привод достаточно сложен, возникают проблемы кинематического соответствия [9]. Система привода от электрогенераторов (рис. 4, б, в) [7, 10] является наиболее перспективной. Ее КПД находится в пределах 65–75 %. Это значит-

но выше, чем у альтернативных систем. Например, гидравлическая система «Load Sensing Power Beyond» имеет КПД 25–55 %.

В настоящее время глобальное потепление и повышение содержания углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) в атмосфере представляет серьезную проблему для экологии. Сельское и лесное хозяйство вносят существенный вклад в глобальные выбросы парниковых газов: более 20 %  $\text{CO}_2$ , 42 % метана и 75 % оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) приходится на данные отрасли [11]. Кроме того, ожидается, что выбросы на сельскохозяйственных предприятиях вырастут в ближайшие десятилетия. Большая часть этих выбросов производится дизельными двигателями тракторов, комбайнов, а также стационарными или мобильными автономными дизель-генераторами. В связи с этим ведущие производители тракторов разрабатывают модели с полностью электрической трансмиссией. В качестве источника энергии выступает не ДВС, а высоковольтная аккумуляторная батарея (табл. 2) [12].

Таблица 2. Характеристики высоковольтных тяговых аккумуляторов сельскохозяйственных тракторов Fendt/AGCO

Номинальная мощность, кВт	50	180	290	380
Емкость, кВт·ч	100	900	1740	2280
Время работы, ч	4	10	12	12
Масса аккумулятора, кг	600	6000	12000	15000

Анализ показывает, что при мощности тракторов 180 кВт и выше масса тяговых аккумуляторов соизмерима с массой тракторов. При мощности 50 кВт масса аккумуляторов составляет 600 кг, что позволяет рассматривать реальную возможность создания электротрактора массой 3000–4000 кг. Стоит отметить, что Fendt/AGCO принимает плотность энергии из расчета 6,6 кг/(кВт·ч) [12], тогда как John Deere для SESAM исходит из расчета 10 кг/(кВт·ч) [6].

Многие сельскохозяйственные предприятия Западной Европы уже производят собственную энергию на солнечных и ветряных электростанциях, биогазовых установках. Это экологически чистое электричество можно использовать для зарядки электрического трактора и, таким образом, эксплуатировать его с нулевым уровнем выбросов. Значительно сокращаются эксплуатационные расходы трактора, а также затраты на запасные части и сервисное обслуживание. Например, нет необходимости в замене моторного масла. Дизельный двигатель и топливный бак в электротракторе заменены электродвигателем, аккумулятором и блоком управления.

Одним из первых тракторов, получившим питание от аккумуляторов, является электрический трактор Fendt e107 V Vario (рис. 5). Производство запланировано на 2024 г. Предполагаемая цена примерно в 1,5–2 раза выше, чем аналогичного дизельного Fendt 207 Vario [12].



Рис. 5. Аккумуляторный электротрактор Fendt e107 V Vario: *а* – внешний вид; *б* – компоновка силового блока и управляющей электроники: 1 – высоковольтная Li-Ion аккумуляторная батарея (700 В, 100 кВт·ч); 2 – блок управления быстрой зарядкой постоянным током и стандартной зарядкой переменным током при напряжении 400 В (стандарт CCS Combo 2); 3 – эффективный электродвигатель с высокой удельной мощностью; 4 – блок управления питанием; 5 – передний ВОМ; 6 – система управления температурным режимом

Электротрактор Fendt e107 V Vario (V – «Vineyard», модель для виноградников) весит примерно на 150 кг больше, чем стандартный 207 Vario. Сохраняются компоновочные размеры предшеству-

ющей модели. Разработан для использования в садах, виноградниках или закрытых помещениях (в теплицах и фермах с собственным производством электроэнергии), а также в коммунальной сфере, например, при обслуживании велосипедных дорожек. Трактор может использоваться для перевозок на короткие расстояния с максимальной транспортной скоростью до 40 км/ч.

Питание осуществляется от высокомогной литий-ионной аккумуляторной батареи напряжением 700 В, мощностью 100 кВт и емкостью 100 кВт·ч.

Время работы трактора между зарядками варьируется в зависимости от множества факторов. Fendt заявляет продолжительность работы своего трактора в 4–7 ч. Система рекуперации энергии позволяет максимально увеличить время работы [12].

Органы управления и система освещения имеют напряжение 12 В, как и у стандартных тракторов серии 200 Vario.

Зарядка аккумуляторов Fendt e107 V Vario осуществляется через стандартный комбинированный автомобильный разъем CCS Combo 2. Он используется в большей части мира (включая Европу, Австралию, Южную Америку, Африку и Азию). Данный разъем используется для зарядки переменным током напряжением 400 В и мощностью 22 кВт на общественных зарядных станциях или через промышленную розетку на 32 А в сочетании с мобильным зарядным устройством мощностью 22 кВт. При такой мощности зарядки аккумулятор можно полностью зарядить за 5 ч. Также разъем CCS Combo 2 поддерживает быструю зарядку постоянным током с зарядной мощностью до 80 кВт, при этом аккумулятор заряжается от 20 до 80 % емкости примерно за 45 мин. Трактор снова готов к использованию [12].

При использовании быстрой зарядки электрический поток автоматически ограничивается. Это позволяет предотвратить повреждение аккумулятора. Срок службы батареи также можно увеличить, ограничив скорость зарядки. Если трактор заряжается ночью и нет необходимости в быстрой зарядке, следует использовать медленную зарядку переменным током. Кроме того, если трактор не работает всю смену, систему можно настроить на прекращение зарядки при достижении определенного значения. Это также поможет продлить срок его службы.

Ускорить процесс зарядки аккумулятора электротрактора можно, сделав его быстросъемным. Это сложно реализовать, если аккумулятор установлен в моторном отсеке (рис. 6, а, б) [6, 12]. Компания Agromec (Флорида, США) создала на базе трактора Fendt серии 700 Vario полностью электрическую модель Electric 700 Vario. В данном тракторе аккумулятор размещен на тягах переднего навесного устройства (рис. 6, в), что позволяет быстро отсоединить аккумулятор и поставить его на зарядку.



Рис. 6. Установка высоковольтных аккумуляторных батарей в моторном отсеке тракторов John Deere SESAM (а), Fendt e107 V Vario (б) и на тягах ПНУ трактора Electric 700 Vario фирмы Agromec (также используется в качестве переднего балласта) (в)

Таким образом время простоя трактора уменьшается до минимума. Также такая компоновка позволяет использовать аккумулятор в качестве переднего балластного груза.

Значительные усилия направлены на удешевление и совершенствование аккумуляторов: внедряются высокоэффективные литий-ионные батареи (Li-Ion) высокой энергоемкости, бескобальтовые литий-железо-фосфатные батареи (LFP) взамен никель-кобальт-алюминиевых аккумуляторов (NCA).

## Заключение

Создание тракторов с электромеханической и электрической трансмиссией позволяет оптимизировать технологические скорости движения, снизить расход топлива и выбросы вредных веществ, увеличить ресурс тракторов, расширить область их применения.

При современном уровне технологий производства электрических компонентов тракторов наиболее вероятно создание трактора с электрической трансмиссией при мощности трактора около 50 кВт. При более высоких значениях мощности целесообразно рассматривать вариант с электромеханической трансмиссией. Перспективно направление по созданию автономного беспилотного трактора.

## Список использованных источников

1. Шарипов, В. М. Проектирование механических, гидромеханических и гидрообъемных передач тракторов / В. М. Шарипов. – М.: МАМИ, 2002. – 300 с.
2. Гурский, Н. Н. Моделирование процессов управления электромеханической трансмиссией колесного трактора / Н. Н. Гурский, А. В. Пашенко, И. Н. Жуковский // Наука и техника. – 2014. – № 2. – С. 41–45.
3. Electrification of agricultural machinery: A review [Electronic resource] / E. Scolaro [et al.]. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/357004885\\_Electrification\\_of\\_Agricultural\\_Machinery\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/357004885_Electrification_of_Agricultural_Machinery_A_Review). – Date of access: 09.10.2023.
4. Трактор с электромеханической трансмиссией / Н. С. Флоренцев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 7. – С. 7–11.
5. Зезетко, Н. И. Техника холдинга «МТЗ-Холдинг» для сельскохозяйственного производства / Н. И. Зезетко // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Минск, 24–25 ноября 2022 г. – Минск : БГАТУ, 2022. – С. 38–45.
6. John Deere [Electronic resource]. – Mode of access: <https://deere.com>. – Date of access: 10.10.2023.
7. Joskin [Electronic resource]. – Mode of access: <https://joskin.com>. – Date of access: 13.10.2023.
8. Гедроить, Г. В. Совершенствование ходовых систем тракторных прицепов / Г. И. Гедроить, С. В. Занемонский // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2023. – Вып. 56. – С. 241–246.
9. Горин, Г. С. Тяговая динамика, поворачиваемость и силовые потоки мобильных тягово-энергетических средств / Г. С. Горин. – Минск: БНТУ, 2013. – 374 с.
10. Fliegl Agrartechnik [Electronic resource]. – Mode of access: <https://fliegl-agrartechnik.de> – Date of access: 13.10.2023.
11. F. Tubiello Greenhouse Gas Emissions Due to Agriculture. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Jan. 2019.
12. Fendt [Electronic resource]. – Mode of access: <https://fendt.com>. – Date of access: 15.10.2023.