

Жданович Ч.И., кандидат технических наук, доцент

Мамонов Л.С., аспирант

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕС НА ТЯГОВО-СЦЕПНЫЕ СВОЙСТВА ПОГРУЗЧИКА

Аннотация. В статье исследуется влияние архитектуры трансмиссии на тягово-сцепные свойства и проходимость полноприводных сельскохозяйственных погрузчиков при работе на рыхлых деформируемых грунтах. Проведен сравнительный анализ трех концепций: классической гидромеханической трансмиссии, системы с единым центральным тяговым электродвигателем и системы с индивидуальным электроприводом каждого колеса (мотор-колеса). Результаты исследования показывают преимущество индивидуального электропривода для сельскохозяйственных погрузчиков.

Abstract. The article examines the influence of transmission architecture on traction properties and cross-country ability of four-wheel drive agricultural loaders when working on loose deformable soils. A comparative analysis of three concepts has been carried out: a classical hydromechanical transmission, a system with a single central traction electric motor, and a system with an individual electric drive of each wheel (motor-wheels). The results of the study show the advantages of an individual electric drive for agricultural loaders.

Ключевые слова. колесный погрузчик, тяговый привод, трансмиссия, индивидуальный электропривод, тягово-сцепные характеристики.

Keywords. wheel loader, traction drive, transmission, individual electric drive, traction characteristics.

Введение. Специфика эксплуатации погрузчика в сельском хозяйстве связана с работой на деформируемых, рыхлых и неоднородных грунтах. Эффективность универсального погрузчика для выполнения широкого спектра задач сельского хозяйства напрямую зависит от тягово-сцепных свойств и проходимости машины, которые в условиях слабых грунтов часто оказываются неоптимальными при использовании традиционных схем трансмиссий, которые зачастую не обеспечивают эффективной реализации тягового усилия. Кроме того, «Работа технологических машин сопряжена с постоянным буксованием ведущих колёс, что может привести к повышенному износу шин и повреждению почвы» [1].

Традиционные схемы с механической дифференциальной связью между осями и колесами передают равный крутящий момент на все ведущие колеса, находящиеся в разных сцепных условиях, что может привести к повышенному буксованию. При блокировке дифференциал все ведущие колеса имеют одинаковую угловую скорость (если ведущие колеса одинакового радиуса). Такое решение само по себе не гарантирует ограничение буксования в желаемых пределах, однако, обеспечивает естественное перераспределение тяги в зависимости от сопротивления движению каждого

ведущего колеса. Но может привести к циркуляции мощности и потерям в трансмиссии. Работа погрузчика в условиях сельского хозяйства часто происходит на деформируемых, неоднородных грунтах с низким коэффициентом сцепления и высоким сопротивлением качению. Это приводит к повышенному буксованию, разрушению структуры почвы и падению тягового КПД. Кроме того при работе погрузчика с ковшом постоянного происходит смещения центра масс, перераспределения нагрузок между осями и бортами, что также требует мгновенного перераспределения крутящих моментов.

В работах [2 - 4] рассматриваются электрические погрузчики с распределенным приводом, где каждая ось оснащена независимым тяговым электродвигателем. Системам управления может отключать один из двигателей или распределять нагрузку между двигателями, что бы они работали в режиме максимального КПД. Дальнейшее совершенствование трансмиссий - индивидуальный электропривод колес [5, 6].

Применение электрических трансмиссий, в частности индивидуально-го электропривода, имеет ряд преимуществ. Электропривод обладает малой инерционностью и позволяет реализовать алгоритмы антибуксовочных систем и системы распределения крутящего момента с гораздо большей скоростью и точностью, чем традиционные дифференциалы. А также позволяет реализовать адаптивное управление распределением тяговых сил путем индивидуального регулирования частоты вращения и крутящего момента каждого колеса, что позволит минимизировать энергопотери за счет исключения паразитной циркуляции мощности и оптимизации скольжения (буксования) в зоне максимального сцепления.

Теоретическое обоснование. Тяговое усилие на ведущем колесе погрузчика ограничивается не только мощностью двигателя, но и условием сцепления колеса с опорной поверхностью. Поэтому фактическое тяговое усилие на i -ом колесе F_{xi} определяется как

$$F_{xi} = \min \left(\frac{M_{wi}}{r_{di}}, F_{\varphi i}(\delta_i) \right),$$

где M_{wi} – крутящий момент, подведенный к колесу; r_{di} – динамический радиус колеса; $F_{\varphi i}$ – сила тяги колеса по сцеплению с опорной поверхностью, зависящая от коэффициента буксования δ_i [7].

Общее тяговое усилие погрузчика: $F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 F_{xi}$. Ключевое отличие трансмиссий разного типа заключается в том, как формируется крутящий момент на колесе M_{wi} и как система реагирует на изменение буксования δ_i на неровном рыхлом грунте.

В случае для гидромеханической трансмиссии (ГМТ) схема передачи крутящего момента выглядит так: ДВС – Гидротрансформатор – КПП – Межосевой и межколесные дифференциалы – Колеса.

Крутящий момент на колесе при идеальном распределении:

$$M_{wi} = \frac{M_e \cdot k_{ic} \cdot u_{gb} \cdot u_d \cdot \eta_{tr}}{4},$$

где M_e – крутящий момент ДВС; k_{ic} – коэффициент трансформации гидротрансформатора, зависящий от кинематического передаточного отношения; u_{gb}, u_d – передаточные числа КПП и мостов; η_{tr} – КПД трансмиссии.

Из-за наличия дифференциалов, если они не заблокированы жестко, при попадании одного колеса на участок с низким сцеплением, его буксование δ_i резко возрастает. При этом крутящий момент падает на всех колесах:

$$F_{\Sigma} = 4 \cdot \min(F_{x1}, F_{x2}, F_{x3}, F_{x4}).$$

Блокировка дифференциалов уравнивает угловые скорости ($\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4$), но на неоднородном грунте это вызывает циркуляцию мощности и повышенный износ шин [7].

В случае для центрального электропривода с единым электродвигателем схема трансмиссии выглядит так: АКБ – Инвертор – Тяговый электродвигатель – КПП – Межосевой и межколесные дифференциалы – Колеса.

Крутящий момент на колесе:

$$M_{wi} = \frac{M_{em} \cdot u_{gb} \cdot u_d \cdot \eta_{tr}}{4}.$$

Механическая связь колес остается такой же, как в ГМТ (те же недостатки дифференциалов). Однако уравнение крутящего момента для электродвигателя отличается от ДВС:

$$M_{em} = \begin{cases} M_{\max}, & \text{при } w_m \leq w_{nom} \\ \frac{P_{\max}}{w_m}, & \text{при } w_m > w_{nom} \end{cases}.$$

Электромотор способен выдавать максимальный момент с нулевых оборотов. Отклик системы управления инвертором ($\tau \approx 1-5$ мс) позволяет реализовать высокоскоростной алгоритм контроля крутящего момента на колесах ведущих мостов, предотвращая закапывание погрузчика, что недоступно для инерционной трансмиссии с ДВС [2 - 4].

В случае для индивидуального электропривода (мотор колеса) схема трансмиссии выглядит так: АКБ – 4 независимых инвертора – 4 электродвигателя с редукторами – 4 колеса. Крутящий момент на каждом колесе задается независимо:

$$M_{wi} = M_{emi} \cdot u_{tr} \cdot \eta_{tr}.$$

И это самая оптимальная топология для сельскохозяйственных условий с точки зрения эффективности реализации мощности. Система управ-

ления решает задачу нелинейной оптимизации в реальном времени, максимизируя тягу каждого колеса независимо от других:

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 \max_{M_{enl}} \left(\min \left(\frac{M_{wi}}{r_{di}}, F_{\phi i}(\delta_i) \right) \right),$$

Математический алгоритм поддерживает буксование каждого колеса δ_i в точке оптимума δ_{opt} (обычно 15-20% для рыхлого грунта [7]), где производная тяги по буксованию равна нулю. Усилие распределяется пропорционально нормальным реакциям, которые динамически меняются, например, при наборе грунта в ковш погрузчика [2 - 4]. Также не возникает кинематического несоответствие как в случае блокировки дифференциалов, когда жестко связанные колеса проходят разные пути, что вызывает циркуляцию паразитной мощности в трансмиссии и увеличивает сопротивление качению, так как «проскальзывающие» колеса разрушают грунт, увеличивая его осадку.

Сравнительный анализ трансмиссий погрузчика. В таблице рассмотрено сравнение характеристик для различных типов трансмиссии погрузчика [2-6].

Таблица – Сравнительный анализ характеристик

Характеристика	ГМТ	Единый электродвигатель	Индивидуальный электропривод
КПД трансмиссии	65–75% (высокие потери в ГДТ)	85–90% (есть потери в мостах)	92–96% (прямой привод/редуктор)
Точность контроля момента	Низкая (инерция ДВС и жидкости)	Высокая (электронное управление)	Максимальная (отдельно для каждого колеса)
Скорость реакции системы	200–500 мс	5–10 мс	< 2 мс
Реализация анти-пробуксовки	Механические/вязкостные муфты	Программное ограничение	Векторное управление
Маневренность	Ограничена дифференциалом	Ограничена дифференциалом	Максимальная (разнотяг колес)
Рекуперация энергии	Невозможна	Возможна (через общую связь)	Максимальная эффективность (на каждом колесе)
Неподдрессоренные массы	Низкие	Низкие	Высокие (при использовании мотор-колес)
Сложность конструкции	Высокая (валы, КПД, ГДТ, мосты)	Средняя (эл. двигатель + мосты)	Минимальная механика, сложная электроника
Надежность на грунтах	Высокая (отработанная годами)	Высокая	Средняя (чувствительность к охлаждению и грязи)
Сервисное обслуживание	Замена масел, фильтров, ремонт КПП	Обслуживание редукторов и мостов	Минимальное (в основном диагностика ПО)
Стоимость	Базовая	+20–30% к базовой	+50–70% к базовой
Экономия энергии	–	20–30%	40–50%

Заключение. Индивидуальные системы электропривода сочетают преимущества электрической тяги с идеальным распределением крутящего момента. Однако они являются самыми дорогими в производстве, поскольку требуют использования накопителей энергии, четырех инверторов, четырех электродвигателей и интеллектуальной системы управления. С другой стороны, они обеспечивают значительные экономические преимущества, включая снижение энергопотребления, повышение производительности (цикл загрузки ускоряется на 15-20% за счет превосходного сцепления) и продление срока службы шин за счет уменьшения пробуксовки колес.

Список использованной литературы

1. Гартфельдер, В.А Законы управления индивидуальным тяговым электроприводом фронтального погрузчика/ В.А Гартфельдер., А.А Стадухин., Н.А. Мокрецов // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 531–541. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-569416>
2. Fei, X. Mechanical Characteristics of Distributed Electric Wheel Loader in Shovel-ing Condition / X. Fei, H. Senrui, S.V. Wong, M. A. Azman, H. Yunwu // Automotive Experiences. – 2023. – Vol. 6. – №2. – P. 336–358. DOI: <https://doi.org/10.31603/ae.9024>
3. Fei, X. Design and Testing of Innovative Type of Dual-Motor Drive Electric Wheel Loader / X. Fei, Y. Han, S.V. Wong, M.A. Azman, W. Shen // Energies 2024, 17, 1542. <https://doi.org/10.3390/en17071542>.
4. Shen, W. Improving Energy Efficiency and Traction Stability in Distributed Electric Wheel Loaders with Preferred-Motor and Load-Ratio Strategies / W. Shen, S. Han, X. Fei, Y. Gao, C. Ji // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 18. – Art. 4969. DOI: [10.3390/en18184969](https://doi.org/10.3390/en18184969).
5. Бижаев, А. В. Использование индивидуального привода колес трактора посредством электрической тяги / А.В. Бижаев, С.М. Ветрова, А.С. Барчукова, Н.С. Кривых // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2024. – Т. 18. – №2. – С. 78–85.
5. Бижаев, А.В. Перспективы использования электротракторов малого тягового класса в сельском хозяйстве / А.В. Бижаев. –М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2024. 38 с.
7. Гуськов, А. В. Тягово-сцепные свойства и проходимость колесного движителя по грунтам со слабой несущей способностью / А. В. Гуськов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2008. – №2. – С. 63–75.

Summary. Individual electric drive systems combine the benefits of electric traction with ideal torque distribution. However, they are the most expensive to produce because they require energy storage units, four inverters, four electric motors, and an intelligent control system. On the flip side, they deliver significant economic benefits, including lower energy consumption, increased productivity (a 15–20% faster loading cycle due to superior traction), and extended tire life due to reduced wheel spin.