

4. 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.

5. Зезетко, Н. И. Техника холдинга «МТЗ-Холдинг» для сельскохозяйственно-го 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. Гедроить, Г. И. Перспективы развития тракторов с электромеханической и электрической трансмиссией / Г. И. Гедроить, С. В. Занемонский // Механизация и электрификация сельского хозяйства : Межведомственный тематический сборник. – Минск : РУП "Издательский дом "Белорусская наука", 2024. – С. 326-332. – EDN EFMMCB.

Summary. Electromechanical power take-off (PTO) systems and electric power take-off for driving the working parts of agricultural implements represent a promising development direction. They provide advanced capabilities for control and workflow automation, which is particularly critical in precision farming systems. Their implementation is highly practical within the framework of the general electrification of agricultural machinery, as well as the creation of tractors featuring electromechanical transmissions and intelligent control systems.

УДК 621.869.4

Жданович Ч.И., кандидат технических наук, доцент;

Муратов А.А., аспирант

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ПРИВОДОВ КОЛЕСНЫХ ПОГРУЗЧИКОВ ДЛЯ НУЖД АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ современных тяговых приводов лёгких и средних (1 – 5 т) колесных погрузчиков, эксплуатируемых в условиях агропромышленного комплекса. Рассмотрены конструктивные особенности и эксплуатационные показатели трансмиссий.

Abstract. This paper presents a comparative analysis of modern traction drives for light and medium-duty (1 – 5 t) wheel loaders operated within the agro-industrial complex. The design features and performance indicators of various transmissions are examined.

Ключевые слова. Колесный погрузчик, агропромышленный комплекс, классификация, гидромеханическая передача, гидростатическая передача, энергоэффективность, тяговое усилие, рабочий цикл.

Keywords. Wheel loader, agro-industrial complex, classification, hydromechanical transmission, hydrostatic transmission, energy efficiency, tractive effort, duty cycle.

Введение. Современное сельскохозяйственное производство характеризуется высокой интенсивностью погрузочно-разгрузочных работ: от обработки зерновых и удобрений до заготовки кормов, и обслуживания животноводческих комплексов. Благодаря широкому спектру навесного оборудования, колесный погрузчик (КП) становится универсальным средством механизации. Анализ специфики применения показывает, что наиболее широко используемым является погрузчик грузоподъемностью около 3,5 т [1].

Специфика агропромышленного комплекса (АПК) предъявляет жесткие и часто противоречивые требования к тяговым приводам машин легкого и среднего классов (погрузчики грузоподъемностью 1–5 т). С одной стороны, необходима высокая приемистость и плавность реверсирования в стесненных условиях складов, с другой – реализация максимального тягового усилия на деформируемых поверхностях (силос, грунт, навоз и т.д.).

Основная часть. На текущем этапе развития мирового машиностроения тяговые приводы КП классифицируются по принципу передачи мощности на следующие группы:

Гидромеханические передачи (ГМП). Классический вариант трансмиссии, распространённый в отечественных и зарубежных погрузчиках среднего класса (например, погрузчики «АМКОДОР 332С4, 342С4, 352С» и Cat, JCB и тд). Включает в себя гидротрансформатор (ГТ), который обеспечивает плавное трогание и защиту ДВС от перегрузок, и планетарной или вальной коробки передач. ГТ обеспечивает автоматическое изменение крутящего момента в зависимости от сопротивления на колесах и позволяет машине трогаться плавно под нагрузкой. Энергия передается посредством циркуляции рабочей жидкости между насосным и турбинным колесами. Наличие гидравлической связи обуславливает внутренние потери энергии на нагрев масла. Для минимизации потерь в транспортном режиме существует функция блокировки трансформатора (Lock-up), когда насосное и турбинное колеса жестко соединяются, превращая трансмиссию в прямую механическую передачу, что исключает гидравлические потери и снижает расход топлива.

Основными преимуществами ГМП является её высокая надежность, возможность передачи больших мощностей, хорошие тяговые характеристики на при выполнении транспортных работ. К недостаткам можно отнести низкий КПД гидротрансформатора при работе в режимах с большим скольжением (фаза внедрения в штабель), разрыв потока мощности при переключении передач, что критично для частого реверсирования в условиях АПК (короткие циклы).

Гидростатические передачи (ГСП). Бесступенчатые приводы, активно внедряемые компаниями отечественного производства «АМКОДОР» (модели 308, 320) и зарубежного Liebherr (модели L 507 – L 514),

Caterpillar (модели 906H – 908H), Volvo (модели L20F – L25F) и др., находят все большее применение благодаря гибкости компоновки и высокой эффективности при частом реверсировании в коротком цикле. ГСП состоит из регулируемого насоса и одного или нескольких гидромоторов [2]:

Одномоторная схема: Один регулируемый насос питает один регулируемый гидромотор, соединенный с редуктором или раздаточной коробкой. В основном применяется на машинах легкого класса грузоподъемностью до 2 т. Преимущества: простота, низкая стоимость.

Двухмоторная схема: Один насос питает два гидромотора, которые работают на общую суммирующую раздаточную коробку. При наборе материала работают оба мотора для обеспечения максимальной тяги. При достижении определенной скорости один мотор отключается, что снижает гидравлические потери и позволяет развить высокую транспортную скорость. По оценкам компании Danfoss система 2MT обеспечивает экономию топлива до 20% по сравнению с гидротрансформатором [3].

Бесступенчатое регулирование и возможность мгновенного изменения направления движения делают её идеальной для работы в стесненных условиях ферм. Исследование П. Иванова и В. Цонева [4] подтверждает, что ГСП превосходит ГМП по топливной экономичности в коротких циклах работы КП, обеспечивая снижение расхода топлива примерно на 8,05%. Однако в длинных циклах при транспортировках на большие расстояния ситуация меняется, и ГМП становится на 4,71% эффективнее за счет меньших потерь на высоких скоростях. Применение двухмоторных схем ГСП позволяет компенсировать данное падение КПД на высоких скоростях.

Для дальнейшей оптимизации работы ГСП в специфических условиях АПК целесообразно применение систем интеллектуального управления мощностью, таких как Danfoss Hybrid Load Control (HLC). Данная технология представляет собой программный алгоритм, который в реальном времени согласует работу двигателя и трансмиссии. Система HLC предотвращает критическое падение оборотов при пиковых нагрузках, автоматически корректируя рабочий объем гидромашин [5].

Двухпоточные трансмиссии (Power-Split). Представлены компаниями ZF сPower, Dana Rexroth Transmission и Liebherr XPower (серия погрузчиков L550–L586). В них крутящий момент от двигателя поступает в планетарный редуктор, где разделяется на две ветви. Одна ветвь представлена гидростатической парой, которая позволяет плавно менять передаточное отношение. Вторая ветвь - механическая. На выходе оба потока объединяются [6]. Для работы в коротком цикле используется гидростатическая часть трансмиссии, что позволяет реализовать требуемый крутящий момент и плавное регулирование скорости. С увеличением скорости движения мощность, передаваемая по механической ветви, возрастает

и достигает почти 100% на максимальной скорости. Это обеспечивает высокий КПД трансмиссии и снижение расхода топлива погрузчиком.

Двухпоточные трансмиссии имеют сложную конструкцию, высокую стоимость производства и обслуживания, а также сложную систему управления. Их применение в КП малого и среднего класса, используемых в АПК, связано с существенными экономическими рисками.

Гибридные и электромеханические трансмиссии (ЭМТ). Перспективным направлением для КП, используемых в АПК, является переход на электрические и гибридные трансмиссии. Их преимущество при работе в закрытых помещениях (склады зерна, животноводческие комплексы) - отсутствие токсичных выбросов.

В исследованиях [7] рассматриваются электрические погрузчики с распределенным приводом (DEWL). Каждый ведущий мост погрузчика оснащен своим независимым тяговым электродвигателем. Система управления является интеллектуальной, она может отключать один двигатель или распределять нагрузку между двигателями, что бы двигатели работали в режиме максимального КПД. Это обеспечивает снижение потребляемой мощности на 18 – 37%, общий КПД системы привода увеличивается на 6 – 13% по сравнению с системами с фиксированным распределением момента. В фазе внедрения в штабель использование алгоритмов распределения крутящего момента на основе мгновенных осевых нагрузок позволяет удерживать пиковое проскальзывание колес в пределах 13 – 15% (против 22 – 35% у классических схем). Среднее значение буксования при этом снижается на 2,6 – 5,9%.

В настоящее время, высокая стоимость электрических компонентов и литий-ионных накопителей ограничивает внедрение гибридных и электрических схем для легких и средних погрузчиков, эксплуатируемых в АПК. Тем не менее, алгоритм распределения момента, представленный в ЭМТ, можно частично применить для двухмоторных ГСП.

Анализ условий эксплуатации в АПК. Применение КП в АПК связано с работой с материалами различной плотности (от легкого зерна до тяжелого влажного силоса) и движением по деформируемым или скользким поверхностям (бетон, асфальт, грунтовые дороги, силос, органическая подстилка и т.д.). Можно выделить следующие часто встречающиеся рабочие циклы [8]:

Короткий (V-образный) цикл характерен для работы на зернотоках (120–150 циклов в час). От трансмиссии требуется быстрый отклик и плавное изменение направления движения. ГСП здесь обладает преимуществом, так как позволяет менять направление движения без использования фрикционных муфт и потери мощности. Исследования траекторий движения и сил сопротивления [9] позволяют оптимизировать алгоритмы

управления именно для этих условий. Существенное влияние на эффективность в этом цикле оказывает уровень квалификации оператора: разница в расходе топлива между водителями может достигать 200% [10].

Длинный цикл (обслуживание ферм) включает транспортировку груза (сенаж, силосная масса, тюки) на значительные расстояния (от 100 до 500 метров) между хранилищем и кормораздатчиком. Движение происходит по внутренним дорогам, которые могут иметь неровности или деформируемое основание. В этом режиме для погрузчика важна топливная экономичность. Привод должен обеспечивать стабильную скорость. Актуально использование функции демпфирования стрелы (Ride Control) и автоматической блокировки гидротрансформатора (если используется ГМП) или перехода на механическую ветвь (в системах Power-Split) для снижения потерь.

Бульдозерный режим применяется при трамбовке силоса и очистке площадок. Отличается низкой скоростью движения и высоким крутящим моментом на ведущих колесах. При низком коэффициенте сцепления избыточный крутящий момент срывает колеса в пробуксовку, что не только разрушает структуру корма, но и приводит к закапыванию техники. Для предотвращения этого целесообразно погрузчики оснащать системами контроля пробуксовки.

Для ГМП этот режим сопровождается максимальным тепловыделением в гидротрансформаторе, в связи с чем важна производительность системы охлаждения масла, в то время как ГСП позволяет более плавно контролировать тягу.

В транспортном режиме погрузчик перемещается по дорогам общего пользования со скоростью до 40 км/ч. В АПК выполняет роль самоходного шасси для перевозки навесного оборудования между удаленными фермами. Тяговый привод должен обеспечивать эффективное торможение.

Таким образом, для привода погрузчика в АПК важны не только базовые характеристики трансмиссии, но и адаптивность к частым циклам и изменяющимся условиям сцепления.

Заключение. Анализ показывает, что для погрузчиков массового сегмента грузоподъемностью 3 - 5 т, работающих в АПК, внедрение сложных двухпоточных трансмиссий, а также последовательных гибридов и ЭМТ является экономически нецелесообразным. Капитальная стоимость таких трансмиссий и требования к их сервисному обслуживанию значительно выше, что увеличивает срок окупаемости машины в условиях АПК. Наиболее сбалансированным решением является применение двухмоторных ГСП в сочетании с системами интеллектуального электронного управления. С помощью таких систем управления, приводы погрузчиков обеспечивают производительность и экономичность, сопоставимую с двухпоточными и гибридными трансмиссиями, при этом их стоимость ниже.

Список использованной литературы

1. Бяков, К.Е. Сравнительная оценка топливной экономичности фронтального погрузчика/ К.Е. Бяков, А.А. Стадухин, Н.А. Мокрецов // Транспортные системы. – 2022. – № 4 (26). – С. 51-62.
2. Капуста, П.П. Трансмиссии колесных погрузчиков с гидростатическим приводом: учеб. пособие / П.П. Капуста, С.В. Полешук. – Мн.: БНТУ, 2012. – 134 с.
3. Danfoss Power Solutions. Technical Information. – Ref. No AB298174786006en-000201 / Nordborg, Denmark: Danfoss Power Solutions Co, 2020.
4. Ivanov, P. Comparison of Fuel Consumption between Wheel Loader with Hydrodynamic and Hydrostatic Transmission/ P. Ivanov, V. Tsonev // Proceedings of the Technical University of Sofia. – 2025. – Vol. 75, Iss. 2. – P. 10-18. DOI: 10.47978/TUS.2025.75.02.002.
5. Danfoss launches Hybrid Load Control for hydrostatic propel applications [Electronic resource] // Danfoss News, 2025. URL: <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/news/dps/danfoss-launches-hybrid-load-control-for-hydrostatic-propel-applications/> (дата обращения: 14.04.2026).
6. Legner, J. ZF cPower – Hydrostatic-Mechanical Powersplit Transmission for Construction and Forest Machinery / J. Legner // 9th International Fluid Power Conference (9. IFK). – Aachen, 2014. – P. 504–515.
7. 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.
8. Чудаков, О.И. Анализ условий эксплуатации фронтальных погрузчиков и синтез расчетных нагрузочных режимов/ О.И. Чудаков // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022. Материалы XXVI Международной научно-технической конференции. Ярославль, 2022. С. 134–142.
9. Wang, S. Modeling and Verification of an Acquisition Strategy for Wheel Loader's Working Trajectories and Resistance / S. Wang, Y. Yin, Y. Wu, L. Hou // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 15. – Art. 5993. DOI: 10.3390/s22155993
10. Frank, B. On wheel loader fuel efficiency difference due to operator behaviour distribution / B. Frank, L. Skogh, M. Alaküla // 15th Scandinavian International Conference on Fluid Power (SICFP2017). – Linköping, 2017. – P. 402–409.

Summary. The analysis indicates that for mass-market wheel loaders with a 3–5 t load capacity operating in the agro-industrial complex, the implementation of complex power-split transmissions, as well as series hybrids and electromechanical transmissions, is economically unfeasible. The capital costs and maintenance requirements of such transmissions are significantly higher, which extends the machine's payback period under agricultural operating conditions. The most balanced solution is the application of dual-motor hydrostatic transmissions combined with intelligent electronic control systems. Through these control systems, loader drives achieve performance and fuel efficiency levels comparable to those of power-split and hybrid transmissions, while maintaining a lower overall cost.