

Научная статья
УДК 630*78

ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ЛЕСНЫХ МАШИН: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**Андрей Петрович Пупышев¹, Иван Евгеньевич Косенков²,
Данил Андреевич Корелин³, Всеволод Федорович Книпенберг⁴**

¹⁻⁴ Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

¹ pupyshevap@m.usfeu.ru

² kosenkov.i.e@yandex.ru

³ korelin.d.2003@gmail.com

⁴ knipenberg10@mail.ru

Аннотация. Ужесточение экологических нормативов, в частности, по выбросам парниковых газов, стимулирует поиск инновационных решений в высокоинтенсивных отраслях, таких как лесозаготовка. В статье рассматривается комплексный обзор и анализ технологий и эффективности гибридизации агрегатов современных лесных машин. Применение гибридных приводов приведет к улучшению экологических показателей.

Ключевые слова: лесная машина, электро-гибрид, гидравлический гибриды, энергоэффективность, лесозаготовка

Для цитирования: Гибридные системы лесных машин: эффективность и перспективы / А. П. Пупышев, И. Е. Косенков, Д. А. Корелин, В. Ф. Книпенберг // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий = Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : материалы XVII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 297–305.

Original article

HYBRID FOREST MACHINE SYSTEMS: EFFICIENCY AND PROSPECTS

**Andrey P. Pupyshev¹, Ivan E. Kosenkov², Danil A. Korelin³,
Vsevolod F. Knipenberg⁴**

¹⁻⁴ Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

¹ pupyshevap@m.usfeu.ru

² kosenkov.i.e@yandex.ru

³ korelin.d.2003@gmail.com

⁴ knipenberg10@mail.ru

Abstract. Stricter environmental regulations, in particular on greenhouse gas emissions, are stimulating the search for innovative solutions in high-intensity industries such as logging. The article provides a comprehensive review and analysis of technologies and efficiency of hybridization of aggregates of modern forest machines. The use of hybrid drives will lead to improved environmental performance.

Keywords: forest machine, electric hybrid, hydraulic hybrid, energy efficiency, logging

For citation: Gibridny`e sistemy` lesny`x mashin: e`ffektivnost` i perspektivy` [Hybrid forest machine systems: efficiency and prospects] (2026) A. P. Pupyshev, I. E. Kosenkov, D. A. Korelin, V. F. Knipenberg. Effektivnyi otvet na sovremennye vyzovy s uchetom vzaimodeistviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii [Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies] : materials of the XVII International Scientific and Technical Conference. Ekaterinburg : USFEU, 2026. P. 297–305. (In Russ).

Современная лесозаготовительная отрасль функционирует в условиях бинарного прессинга, обусловленного, с одной стороны, рыночной волатильностью в секторе древесины, а с другой – прогрессирующим ужесточением экологических регламентов, достигших своей кульминации в стандарте Stage V. Указанные вызовы актуализируют необходимость фундаментального реинжиниринга устоявшихся концепций проектирования силовых агрегатов специализированной лесозаготовительной техники.

В качестве наиболее релевантного технологического отклика на обозначенные тренды выступает гибридизация – принцип, инкорпорированный из смежных машиностроительных отраслей и модифицированный применительно к специфическим эксплуатационным условиям лесозаготовки. Базовой стратегией модернизации выступает даунсайзинг (уменьшение) – инсталляция двигателя внутреннего сгорания редуцированных мощностных характеристик, позволяющая минимизировать расход топлива и объем вредных выбросов в зонах частичной нагрузки. Компенсация энергетического дефицита в пиковые моменты рабочего цикла осуществляется посредством интеграции бустерных систем электромеханического или гидравлического типа [1].

В соответствии с систематизацией [2], гибридные приводные системы для лесных машин подразделяются на три фундаментальные категории, определяемые типом используемой энергии: электромеханические, гидравлические и комбинированные электрогидравлические комплексы.

Электромеханические системы характеризуются наиболее высокой степенью технологической проработанности. Их архитектурная структура включает следующие ключевые элементы:

– генератор: функционирует в качестве электромеханического конвертера, трансформирующего кинетическую энергию вращения вала ДВС в электроэнергию;

– инвертор: представляет собой статический преобразовательный модуль, осуществляющий биполярную конверсию постоянного тока (DC) в переменный (AC) и обратно, обеспечивая реализацию рекуперативных режимов [3, 4].

– накопитель энергии: выполняет функцию буферного резервуара, аккумулирующего энергетические излишки и отдающего их в периоды пикового энергопотребления;

– электродвигатель-генератор: универсальный агрегат, обеспечивающий привод рабочих органов и рекуперацию энергии при торможении или опускании оборудования.

В зависимости от типа взаимодействия компонентов различают следующие конфигурации электрогибридов:

– последовательная: ДВС функционирует в качестве стационарного электрогенератора, питающего бортовую сеть через электрическую шину. Схема обеспечивает работу ДВС в зоне максимального КПД, но сопровождается потерями при каскадном энергопреобразовании;

– параллельная: предполагает кинематическое соединение ДВС и электромотора с трансмиссией, что допускает их как отдельную, так и совместную работу. Отличается конструктивной простотой, но ограниченной гибкостью управления нагрузкой ДВС;

– смешанная (Power-Split): использует планетарный механизм для нелинейного распределения мощности между ДВС, генератором и электромотором, комбинируя достоинства последовательной и параллельной схем. Обладает максимальной эффективностью при повышенной сложности и стоимости [5].

Внедрение параллельной гибридной архитектуры демонстрирует харвестер Logset 12H GTE (рис. 1). Его силовая установка интегрирует электродвигатель на вал ДВС, а интеллектуальная система управления осуществляет коммутацию режимов мотор/генератор в зависимости от текущей нагрузки. Накопление энергии реализовано на массиве суперконденсаторов со временем регенерации 9...10 с. По данным производителя, система обеспечивает до 72 % прироста мощности, 54 % увеличения крутящего момента, 27 % роста гидравлического расхода в пике и 25 % экономии топлива [6].



Рис. 1. Logset 12H GTE

Гидравлические системы гибридации базируются на применении гидроаккумулятора – устройства, аккумулирующего избыточную гидравлическую энергию посредством ее конверсии в потенциальную энергию сжатого газа.

К их конкурентным преимуществам относятся: экстремальная удельная мощность, позволяющая осуществлять генерацию и абсорбцию значительных мощностей в кратковременных режимах; технологическая преемственность и надежность, обусловленные устоявшейся элементной базой; жизненный цикл, на порядок превышающий ресурс электрохимических аккумуляторов; демпфирование гидравлических пульсаций, повышающее плавность работы и долговечность компонентов [7].

Конфигурации гидравлических гибридов повторяют электрические аналоги. Перспективной разработкой (Bosch Rexroth) является концепция «гидравлического маховика» (hydraulic flywheel), способного сохранять как кинетическую, так и избыток гидравлической энергии в батарее и мотор-генераторе, что делает установку пригодной для параллельной интеграции с существующей системой [8].

Комбинированные электрогидравлические системы реализуют принцип синергетической интеграции, нивелируя свойственные недостатки каждого из приводов (рис. 2). Примером служит система AMGERS, в которой гидроаккумулятор, установленный между пропорциональным клапаном и гидробаком, обеспечивает рекуперацию на гидравлическом уровне, а гидромотор-генераторный узел на линии слива – на электрическом [9].

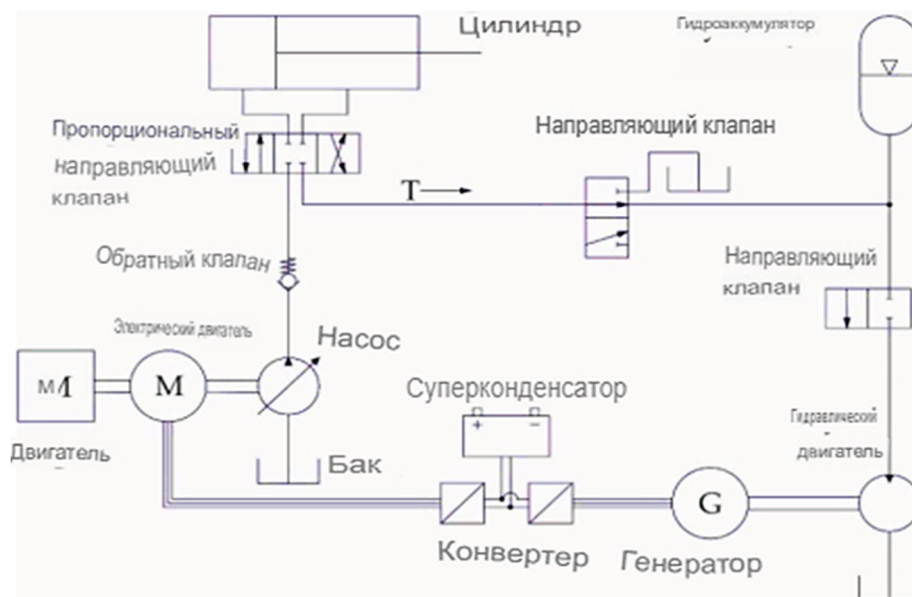


Рис. 2. Комбинированная электрогидравлическая схема

На схеме (см. рис. 2) гидроаккумулятор устанавливается между пропорциональным клапаном и гидробаком, накапливая избыточную энергию давления и сглаживая пики. Гидромотор, установленный на линии слива гидравлической жидкости, приводится в действие потоком, возвращающимся в бак. Гидромотор вращает электрический генератор, который вырабатывает электричество.

Выработанная электроэнергия либо запасается в электрических накопителях, либо используется для питания других электропотребителей или электромоторов машины.

Такая двухконтурная система обеспечивает чрезвычайно гибкое управление энергией. Она позволяет рекуперировать энергию как на уровне гидравлики (через аккумулятор), так и на уровне электрики (через генератор), что в перспективе позволяет оптимизировать размеры как гидравлических, так и электрических компонентов, создавая более компактные и эффективные силовые установки для лесных машин.

Сводные данные, полученные в результате анализа исследований [2] и других источников, свидетельствуют о значительном эксплуатационном потенциале гибридных систем.

Электро-гибриды показывают стабильную экономию топлива в диапазоне 20...50 %. Система Logset демонстрирует около 25 % экономии. Гибридные экскаваторы от лидеров рынка показывают результаты на верхней границе этого диапазона – до 50 % [10].

Гидравлические гибриды: экономия топлива обычно несколько скромнее и составляет 15...28 %, однако при оптимизированных конфигурациях (например, power-split) может достигать 40 % и более [11].

Снижение выбросов CO₂ прямо пропорционально экономии топлива. Для гибридных машин это означает сокращение выбросов на сотни килограммов и даже тонны CO₂ в год на единицу техники (табл. 1).

Таблица 1

Сводные характеристики гибридных лесных машин

Модель/ Прототип	Тип гибридизации	Снижение расхода топлива (%)	Снижение выбросов CO ₂	Особенности
Logset 12H GTE	Параллельный электро-гибрид	~ 25 %	Значительное	Суперконденсаторы, +72 % мощности
Прототип Agama a.s.	Последовательный электро-гибрид	~ 20...30 % (оценочно)	Значительное	Батарея, синхронный двигатель
Гибридный экскаватор (Komatsu)	Последовательный/смешанный электро-гибрид	До 50 %	Очень значительное	Два мотор-генератора, суперконденсаторы
Система с гидроаккумулятором	Параллельный гидравлический гибрид	15...28 % (до 40 %)	Значительное	Простота интеграции, высокая мощность

На основе материала можно составить развернутую таблицу преимуществ и недостатков (табл. 2).

Таблица 2

Всесторонний анализ сильных и слабых сторон гибридных лесных машин

Сильные стороны	Слабые стороны
Экологические: снижение расхода топлива и выбросов парниковых газов; уменьшение шумового и вибрационного воздействия на оператора и окружающую среду	Экономические: высокая начальная стоимость (на 30...50 % выше, чем у традиционных аналогов); дорогостоящий ремонт и обслуживание сложных систем

Сильные стороны	Слабые стороны
Эксплуатационные: лучшая эргономика (тише, меньше вибраций); плавная и мгновенная подача мощности; улучшенное распределение тяги по колесам (за счет индивидуальных электромоторов); снижение массы машины (при даунсайзинге ДВС)	Технические: повышенная сложность и масса системы в целом; риск перегрева электронных компонентов; ограниченная энергоемкость и срок службы накопителей (особенно батарей)
Технические: возможность рекуперации энергии; снижение нагрузки на ДВС и увеличение его ресурса; сглаживание пиковых нагрузок в гидросистеме; потенциал для дистанционного управления и телематики	Экологические (скрытые): проблемы с утилизацией отработавших накопителей (батареи, суперконденсаторы), содержащих редкоземельные и токсичные металлы; экологический след от производства этих компонентов
Производительность: увеличение мощности и крутящего момента в пиковых режимах, что может привести к росту производительности	Эксплуатационные: необходимость в высококвалифицированном сервисном персонале; меньшая предсказуемость долговечности новых компонентов

Помимо перечисленных в таблице слабых сторон, существуют системные вызовы: недостаточная предсказуемость ресурса накопителей. Производители, как правило, не предоставляют детализированных данных о долговечности батарей и суперконденсаторов в условиях экстремальных эксплуатационных нагрузок (вибрационные воздействия, термические колебания).

Несмотря на технологический прогресс, ни один из современных типов накопителей не способен конкурировать с дизельным топливом по показателю удельной энергоемкости. Это ограничивает автономность полностью электрических машин и оставляет гибриды промежуточным, хотя и высокоэффективным, решением.

Отсутствие единых отраслевых стандартов для гибридных компонентов может затруднять их обслуживание и замедлять распространение технологий.

Проведенный анализ позволяет констатировать переход гибридных силовых установок из категории экспериментальных разработок в класс коммерчески оправданных технологий. Дальнейшее развитие связано с оптимизацией архитектурных решений и созданием адаптивных систем управления энергопотоками. Определение точных энергетических требований машин в различных природно-производственных условиях

составит основу для создания следующего поколения высокоэффективной лесозаготовительной техники.

Таким образом, разработка и углубленное исследование гибридных, а в перспективе и чисто электрических лесных машин, остается одной из важнейших задач для научного сообщества. Определение точных энергетических требований машин в различных природно-производственных условиях станет основой для создания следующего поколения экологически чистой и высокопроизводительной лесозаготовительной техники.

Список источников

1. Energy Audit of Wood Harvesting Systems / R. Klvač, S. Ward, P. M. O. Owende, J. Lyons // Scandinavian Journal of Forest Research. 2003. № 18 (2). P. 176–183.
2. Technical Solutions of Forest Machine Hybridization / V. Mergl, Z. Pandur, J. Klepárník [et al.] // Energies. 2021. № 14. P. 1–14.
3. Einola K. Prestudy of a Power Management of a Cut-to-Length Forest Harvester with a Hydraulic Hybrid System // 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power (June 3–5, 2013, Linköping, Sweden). 2013. P. 71–83.
4. Procházka P., Pazdera I., Cipín R. Hybrid Tree Harvester Machine with Battery Powered Hydro-Electric Drive // ECS Transactions. 2019. № 89 (1). P. 135–143.
5. New Holland Construction. E70B Hybrid Concept // CNH Industrial Technical Bulletin. 2019.
6. Mergl V., Kašpárek Ja. Numerical Determination of the Accuracy of Gravity Center Coordinates and Stability of a Model Concept of Harvester with the Rigid Frame // Forests. 2002. № 13 (4). P. 1–16.
7. Hybrid Powertrain Design for Non-Road Mobile Machines: An Overview / P. Sainio, T. Minav, S. Kukkonen [et al.] // IEEE Transportation Electrification Conference. 2018. P. 401–407.
8. A comprehensive overview of hybrid construction machinery / Ji. Wang, Zh. Yang, Sh. Liu [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. 2016. № 8 (3). P. 1–15.
9. Lin T., Wang Q. Hydraulic Accumulator-Motor-Generator Energy Regeneration System for a Hybrid Hydraulic Excavator // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2012. № 25 (1). P. 140–147.
10. Johnsen T. 12H GTE Hybrid // Logset. 2021. 6 p.
11. Operating Characteristics of a Timber Trailer with a Hybrid Drive / T. Zemánek, P. Procházka, I. Pazdera [et al.] // Forests. 2022. № 13 (8). P. 1–15.

References

1. Energy Audit of Wood Harvesting Systems / R. Klvač, S. Ward, P. M. O. Owende, J. Lyons // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2003. No. 18 (2). P. 176–183.
2. Technical Solutions of Forest Machine Hybridization / V. Mergl, Z. Pandur, J. Klepárník [et al.] // *Energies*. 2021. No. 14. P. 1–14.
3. Einola K. Prestudy of a Power Management of a Cut-to-Length Forest Harvester with a Hydraulic Hybrid System // 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power (June 3–5, 2013, Linköping, Sweden). 2013. P. 71–83.
4. Procházka P., Pazdera I., Cipín R. Hybrid Tree Harvester Machine with Battery Powered Hydro-Electric Drive // *ECS Transactions*. 2019. No. 89 (1). P. 135–143.
5. New Holland Construction. E70B Hybrid Concept // *CNH Industrial Technical Bulletin*. 2019.
6. Mergl V., Kašpárek Ja. Numerical Determination of the Accuracy of Gravity Center Coordinates and Stability of a Model Concept of Harvester with the Rigid Frame // *Forests*. 2002. No. 13 (4). P. 1–16.
7. Hybrid Powertrain Design for Non-Road Mobile Machines: An Overview / P. Sainio, T. Minav, S. Kukkonen [et al.] // *IEEE Transportation Electrification Conference*. 2018. P. 401–407.
8. A comprehensive overview of hybrid construction machinery / Ji. Wang, Zh. Yang, Sh. Liu [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. No. 8 (3). P. 1–15.
9. Lin T., Wang Q. Hydraulic Accumulator-Motor-Generator Energy Regeneration System for a Hybrid Hydraulic Excavator // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2012. No. 25 (1). P. 140–147.
10. Johnsen T. 12H GTE Hybrid // *Logset*. 2021. 6 p.
11. Operating Characteristics of a Timber Trailer with a Hybrid Drive / T. Zemánek, P. Procházka, I. Pazdera [et al.] // *Forests*. 2022. No. 13 (8). P. 1–15.