



СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОЛЕСНОГО ПОГРУЗЧИКА И ДИЗЕЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА

На основе данных о себестоимости и потенциальном вреде для дороги решается многокритериальная оптимизационная задача по выбору оптимальной модели транспорта. Модифицированный метод поиска Парето-оптимальных решений применяется в качестве математического метода. Результаты экспериментальных исследований влияния параметров перевозочного процесса на коэффициент использования грузоподъемности представлены. Полученная математическая оптимизационная модель готова для интеграции в автоматизированные системы управления грузоперевозками и имеет погрешность расчетов до 12,8 %.

Электрический колесный погрузчик, дизельный колесный погрузчик, потребление энергии, нулевые выбросы, литий-железо-фосфатная батарея.

Тренд на применение техники на электрической тяге продолжает развиваться и проникать в сегменты, ранее незатронутые этим видом привода. Например, тяжелая дорожно-строительная техника. Электропогрузчики давно широко применяются в складском хозяйстве в качестве основного типа вилочных погрузчиков, однако среди колесных погрузчиков большой грузоподъемности (5 и более тонн) этот тип привода встречается еще пока редко. В настоящее время все мировые производители дорожно-строительной техники имеют в своей продуктовой линейке один или несколько погрузчиков на электротяге. К сожалению их эффективность еще слабо изучена в связи с общим небольшим количеством техники данного типа. Однако ее применение требует дополнительного исследования с точки зрения эффективности эксплуатации и минимизации эксплуатационных затрат [1].

Электрические транспортные средства (EV) могут снизить выбросы парниковых газов в транспортном секторе благодаря декарбонизации электросети. Регулирование отрасли может также уменьшить выбросы от транспортных средств с традиционными двигателями (ICEV). Факторы, такие как топливная экономия и состав электросети, влияют на выбросы. Авторы работы [1] использовали оценку жизненного цикла для сравнения выбросов от EV и ICEV в США и четырех штатах с 2018 по 2030 год. В большинстве условий выбросы для EV оказались ниже. EV и ICEV вместе могут более быстро снизить выбросы парниковых газов в транспортном секторе [2, 3]. Однако в ряде сфер (грузовая и спецтехника) применение EV еще долго может быть неэффективным.

Строительная техника является значительным источником загрязнения. Исследования показывают, что в рабочем режиме происходит резкое увеличение выбросов CO, HC, NO_x и частиц. При ужесточении стандартов выбросов CO, HC и NO_x уменьшились, но по-

грузчики продолжают выделять больше выбросов в режиме движения. Сравнение экскаваторов и погрузчиков показало, что последние вносят более серьезный вклад в загрязнение окружающей среды. Измеренные выбросы CO и HC превышают рекомендованные значения, в то время как NO_x оказывается недооцененным.

Исследования по электрическим погрузчикам не раскрывают подробно энергосберегающие аспекты в фазе подготовки к процессу погрузки, характеризующейся высокой вероятностью скольжения шин погрузчика. Результаты показывают, что эффективность преобразования энергии максимальна в режиме одиночного привода, когда ковш не создает положительного давления на грунт.

В исследовании рассматривается вопрос сравнения энергопотребления и эффективности работы фронтальных погрузчиков грузоподъемностью 5 тонн с электрическим и традиционным дизельным двигателем.

Экспериментальные данные для исследования были получены за 8 месяцев эксплуатации техники на предприятии Московского региона Россия в течение 2022–2023 годов. Предприятия занимаются добычей и перевозкой строительных насыпных грузов: песок, щебень, торф, плодородный грунт. Парк автомобилей – грузовые автомобили самосвалы грузоподъемностью от 14 до 28 т. Для погрузки указанных материалов используются колесные погрузчики различных марок, в т.ч. Liu Gong (Китай). В 2022 году предприятие в качестве эксперимента купило электрический колесный погрузчик Liu Gong 856 HE грузоподъемностью 5,8 тонны, кроме того в парке уже более года на тот момент работало 6 погрузчиков этой же фирмы с дизельными двигателями Liu Gong 856 MAX. Внешний вид электрического погрузчика при работе по погрузке самосвала представлен на рисунке.



Рис. Внешний вид электрического погрузчика Liu Gong 856 HE в процессе загрузки самосвала

Таблица 1

**Сравнение технических характеристик
колесных погрузчиков Liu Gong 856 HT4 и Liu Gong 856 HE MAX**

Характеристика	Liu Gong 856 HT4 MAX	Liu Gong 856 HE
Тип погрузчика	Дизельный	Электрический
Номинальная грузоподъемность, кг	5800	5800
Общая номинальная мощность, кВт	168	180
Масса, кг	17 250	20 081
Номинальный объем ковша, м ³	3,5	3,5
Максимальное усилие отрыва (при наклоне ковша), кН	172	160
Опрокидывающая нагрузка (выравнивающая), кг	12 800	15 210
Общее время цикла, сек	10,3	9
Максимальная скорость движения вперед, км/ч	39,5	40
Двигатель/приводной мотор	QSB6.7 Tier 4F	Weiteli
Макс. крутящий момент, Нм	949	1200
Модель трансмиссии	4WG200 Фиксированные валы, переключение без разрыва мощности 4 передачи вперед и 3 передачи заднего хода	EAT700 Планетарная КПП, электронное управление переключением передач 2 передачи переднего хода и 1 передача заднего хода
Аккумуляторная батарея питания	-	CATL Литий-железо-фосфатный аккумуляторный блок
Номинальная энергия накопления, кВтч	-	350
Номинальное напряжение, В	-	580
Время зарядки (зарядная станция мощностью 300 кВт)	-	≤75 min
Мотор гидравлической системы	-	Weiteli
Номинальный крутящий момент, Нм	-	500
Номинальная мощность, кВт	-	105

По данным телематических систем, установленных на технике, а также статистических данных о выполненной работе, потреблении топлива и натуральных наблюдений были получены данные по

времени работы каждого погрузчика, объеме перегружаемого материала, количестве циклов работы в час и потреблении топлива. Величина энергопотребления электрического погрузчика фиксирова-

лась по данным зарядной станции и отчетов предприятия.

Сравнение технических характеристик погрузчиков представлено в таблице.

Из сравнения технических характеристик колесных погрузчиков Liu Gong 856 HT4 MAX и Liu Gong 856 HE Max следуют несколько ключевых выводов. Liu Gong 856 HT4 работает на дизельном топливе, в то время как Liu Gong 856 HE Max является электрическим. Liu Gong 856 HE Max имеет такую же грузоподъемность (5800 кг) что и Liu Gong 856 HT4 (5000 кг) и обладает большей общей номинальной мощностью (180 кВт), чем Liu Gong 856 HT4 (168 кВт). Liu Gong 856 HE Max также имеет большую номинальную массу при одинаковой емкости стандартного ковша. Он оборудован электрической батареей CATL с номинальной емкостью 350 кВт·ч и достаточно быстрым временем зарядки, при использовании оригинальных зарядных станций. При этом Liu Gong 856 HT4 использует традиционную механическую передачу, в то время как Liu Gong 856 HE Max оснащен механической планетарной системой передачи с электрическим управлением. Liu Gong 856 HE Max также имеет более высокие характеристики гидравлического двигателя по сравнению с Liu Gong 856 HT4. В целом, Liu Gong 856 HE Max представляет собой электрический погрузчик с аналогичной дизельной версии грузоподъемностью и более высокой мощностью и конструкционной массой, подчеркивая переход от традиционных дизельных двигателей к более устойчивым и эффективным электрическим решениям в строительной технике. Однако более высокая масса и большая мощность двигателя заставляют сомневаться в уровне энергопотребления этой модели относительно дизельной версии. Для оценки этой ситуации следует провести более детальное исследование энергопотребления обеих машин.

Исходя из принципиальной разности обеих машин, они имеют несколько различные трансмиссии и силовой передачи. Электрический погрузчик имеет два электромотора: один ходовой для движения машины и второй для привода гидравлических насосов рабочей гидравлической системы. У обоих погрузчиков три карданных вала для привода двух ведущих мостов и присутствует механическая коробка передач. Особенность традиционной схемы в том, что один дизельный двигатель используется в качестве источника энергии для привода гидравлических насосов и движения всей машины через коробку передач. При этом между двигателем и коробкой передач находится гидротрансформатор без функции принудительной блокировки.

В ходе сбора экспериментальных данных было установлено, что расход топлива для дизельных погрузчиков составляет в зависимости от условий работы от 8 до 17 л/ч дизельного топлива, в условиях погрузки самосвалов на предприятии средний расход составил порядка 12,4 л/ч.

По итогам эксплуатации электрического погрузчика было выяснено, что время автономной работы составляет от 7 до 8 часов при времени зарядки по-

рядка 45 минут до 70 % степени заряженности аккумуляторных батарей.

На дизельном погрузчике установлен двигатель Cummins QSB6.7 Tier 4F с расходом топлива при номинальной мощности 228 г/кВт·ч. При этом аналитически расход топлива $Q_{\text{диз}}$ может быть рассчитан по формуле (1):

$$Q_{\text{диз}} = (N \cdot G) / (1000 \cdot \rho \cdot k), \text{ л/ч}, \quad (1)$$

где N – номинальная мощность двигателя, кВт;

G – удельный расход топлива двигателя, г/кВт·ч;

ρ – плотность дизельного топлива, кг/л;

k – отношение времени работы двигателя при номинальной частоте вращения (режим максимальной мощности) коленвала к времени работы на частоте холостого хода, выраженных в процентах.

Подставив в формулу (1) известные данные, получим в результате величину коэффициента k для наших дизельных погрузчиков и имеющейся на предприятии работы – $k = 3,63$.

Так как k находится по формуле (2):

$$k = A/B, \quad (2)$$

где A – время работы двигателя при номинальной частоте вращения (режим максимальной мощности) коленвала, ч;

B – время работы двигателя на частоте холостого хода, ч.

Тогда зная, что $A+B=100\%$, получим величины $A = 21,6\%$ и $B = 78,4\%$. Указанные величины дают представление о степени загрузки погрузчиков Liu Gong 856 HT4 MAX в рамках ежедневной работы на исследуемом предприятии по погрузке самосвалов.

Что касается электрического погрузчика Liu Gong 856 HE Max, то по данным натурных наблюдений его аккумуляторные батареи общей номинальной емкостью 350 кВт·ч до 70 % степени заряженности заряжаются за время равное 45 минутам. При этом в аналогичном режиме работы, как и у дизельных погрузчиков, их хватает на работу в 7–8 часов до степени разряженности в 10–15 %.

Можно рассчитать, что количество энергии $Q_{\text{эл}}$, которое расходуется при работе погрузчика в среднем за 6,5 часов, равно:

$$Q_{\text{эл}} = 350 \cdot (0,7 - 0,125) = 201 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Тогда часовой расход электроэнергии погрузчиком составляет примерно 31 кВт·ч. Здесь нужно учесть, что дизельный двигатель работает в режиме погрузки близко к номинальным оборотам только при выполнении энергонасыщенных операций: набор материала в ковш, подъем стрелы с загруженным ковшом, в остальное время он работает с минимальной нагрузкой на оборотах чуть выше холостых или работает на холостых оборотах в ожидании погрузки. Расчеты потребляемой мощности при этом приведены в таблице 2.

Таблица 2

Примерное потребление мощности дизельным колесным погрузчиком по результатам работы

Режим работы	Расчетные величины энергопотребления		
	соотношение времени, %	потребляемая мощность, кВт·ч	расход топлива, л/час
Номинальная мощность	21,6	35,28	45
Работа с минимальной нагрузкой или холостой ход	78,4	18,72	6,5
Итого	100	54	10,73

Определим приблизительные потери энергии в обоих погрузчиках. Для дизельной машины при передвижении общий КПД будет состоять из КПД двигателя (0,41), гидротрансформатора (0,75), гидромеханической коробки передач (0,91), карданных валов (0,97) и конических главных передач в мостах (0,94). Пренебрегаем потерями трения в подшипниках и для простоты расчетов не учитываем распределение крутящего момента на два моста. Тогда итоговый КПД дизельного погрузчика в режиме движения от двигателя до колес будет составлять:

$$\eta_{\text{диз}} = 0,41 \cdot 0,75 \cdot 0,91 \cdot 0,97 \cdot 0,94 = 0,25.$$

Для дизельной машины в режиме работы гидравлического оборудования и без движения с учетом оборудования погрузчика аксиально-плунжерным насосом общий КПД будет состоять из КПД двигателя (0,41), гидротрансформатора (0,75), КПД аксиально-плунжерного насоса (0,93). При этом КПД гидроцилиндров для упрощения учитывать не будем. Тогда итоговый КПД дизельного погрузчика в режиме работы гидравлического оборудования и без движения будет составлять:

$$\eta_{\text{диз}} = 0,41 \cdot 0,75 \cdot 0,93 = 0,28.$$

Для электрического погрузчика при передвижении общий КПД будет состоять из КПД электрического двигателя типа PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) (0,94), планетарной коробки передач (0,90), карданных валов (0,97) и конических главных передач в мостах (0,94). Пренебрегаем потерями трения в подшипниках и для простоты расчетов не учитываем распределение крутящего момента на два моста. Тогда итоговый КПД электрического погрузчика в режиме движения от двигателя до колес будет составлять:

$$\eta_{\text{эл}} = 0,94 \cdot 0,90 \cdot 0,97 \cdot 0,94 = 0,77.$$

Для электрического погрузчика в режиме работы гидравлического оборудования и без движения с учетом оборудования погрузчика аксиально-плунжерным насосом общий КПД будет состоять из КПД электрического двигателя (0,94), КПД аксиально-плунжер-

ного насоса (0,93). При этом КПД гидроцилиндров для упрощения учитывать не будем. Тогда итоговый КПД электрического погрузчика в режиме работы гидравлического оборудования и без движения будет составлять:

$$\eta_{\text{эл}} = 0,94 \cdot 0,93 = 0,87.$$

Общие расчетные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расчетные КПД привода и трансмиссии электрического и дизельного погрузчиков в разных режимах работы

Режим	Liu Gong 856 HT4 MAX	Liu Gong 856 HE
Движение	0,25	0,77
Использование рабочего оборудования без движения (погрузка)	0,28	0,88

Сравним производительность работы обоих погрузчиков при работе по погрузке сыпучих грузов (песок) в самосвалы в условиях рассматриваемого предприятия. Для этого сначала определим цикловую производительность $A1$ ($\text{м}^3/\text{цикл}$) по формуле (3):

$$A1 = V \cdot K1, \text{ м}^3/\text{цикл}, \quad (3)$$

где V – объем ковша, м^3 ;

$K1$ – коэффициент наполнения ковша в зависимости от материала.

Для увлажненного песка $K1 = 1,05$ и для обоих погрузчиков с стандартным ковшом $3,5 \text{ м}^3$ – $A1 = 3,68 \text{ м}^3/\text{цикл}$. Время цикла $T1$ по справочным данным Liu Gong и данным замеров предприятия для дизельного погрузчика – 24 секунды, для электрического – 21 секунда. Тогда теоретическое число циклов в час $N1$ для погрузчика может быть определено по формуле (4):

$$N1 = 3600/T1, \text{ цикл/ч.} \quad (4)$$

Тогда для дизельного погрузчика $N1 = 150$ цикл/ч и для электрического погрузчика $N1 = 171$ цикл/ч. Фактическая величина производительности $C1$ определяется по формуле (5) с учетом коэффициента использования рабочего времени погрузчика $K3$. По данным натурных испытаний для рассматриваемого предприятия при погрузке самосвалов величина $K3$ (отношение фактически отработанного времени к общему времени работы с учетом ожидания) равна 0,53.

$$C1 = A1 \cdot N1 \cdot K3, \text{ м}^3/\text{ч.} \quad (5)$$

Тогда для дизельного погрузчика и электрического погрузчика фактическая производительность равна 292,56 и 331,51 $\text{м}^3/\text{ч}$ соответственно. Время рабочей смены на предприятии 12 часов, тогда за смену дизельный погрузчик может обеспечить выработку в 3510 м^3 перегружаемого материала. Электрический погрузчик работает по результатам наблюдений в среднем 7,5 часов до необходимости зарядки аккумуляторных батарей. С учетом времени движения к

станции зарядки, времени зарядки (примерно 45 минут) и подъезда к месту работ обратно тратится еще 1 час. Фактически за 12 часовую смену он работает порядка 11 часов. Тогда фактическая выработка электрического погрузчика за смену равна 3646 м^3 перегружаемого материала.

В результате исследования установлено, что дизельные погрузчики на предприятии потребляют от 8 до 17 литров дизельного топлива в час, средний расход при погрузке самосвалов – 12,4 л/ч. Электрический погрузчик работает автономно 7–8 часов, заряжается до 70 % за 45 минут. Для электрического погрузчика Liu Gong 856 HE Max рассчитан часовой расход электроэнергии – примерно 31 кВт·ч.

Рекомендуется оптимизировать режимы работы дизельных погрузчиков в зависимости от нагрузки и учесть различия в расходе энергии в разных режимах, снижая по возможности простой без работы.

Работа погрузчика при номинальной мощности занимает 21,6 % времени, при этом используется 35,28 кВт·ч мощности и расходуется 45 литров топлива в час для дизельного погрузчика. В то время как работа с минимальной нагрузкой или на холостом ходу занимает 78,4 % времени, при этом потребление мощности снижается до 18,72 кВт·ч, а расход топлива составляет 6,5 литра в час. В сумме за оба режима работы дизельный погрузчик потребляет 54 кВт·ч энергии и имеет средний расход топлива 10,73 литра в час. Это значительно выше, чем 31 кВт·ч для электропозгрузчика.

Итоговые данные подчеркивают, что работа с минимальной нагрузкой или на холостом ходу занимает значительную часть времени эксплуатации. Однако даже в этом режиме дизельный погрузчик потребляет энергию и топливо. Важно обратить внимание на возможность оптимизации работы при номинальной мощности с целью снижения расхода топлива, что имеет значение с точки зрения экономии ресурсов и соблюдения экологических норм.

Из проведенных расчетов КПД для дизельного и электрического погрузчиков в различных режимах работы можно сделать следующие выводы: дизельный погрузчик в режиме движения от двигателя до колес обладает общим КПД в 0,25, в то время как в режиме работы гидравлического оборудования без движения (погрузка) этот показатель составляет 0,28. Электрический погрузчик проявляет более высокий общий КПД в обоих режимах, равный 0,77 при движении и 0,87 при работе гидравлического оборудования без движения. Эти результаты свидетельствуют о более эффективном использовании энергии в электрической системе, что может быть выгодным с точки зрения энергосбережения и экономии ресурсов.

Сравнив производительность дизельного и электрического погрузчиков при погрузке сыпучих грузов (песка) в самосвалы на рассматриваемом предприятии, делаем следующие выводы. Оба погрузчика с 3,5-метровым стандартным ковшом имеют схожую цикловую производительность, оцененную в $3,68 \text{ м}^3/\text{цикл}$ для увлажненного песка.

По величине теоретического числа циклов в час электрический погрузчик превосходит дизельный, способный на 171 цикл в час по сравнению с 150 циклами у дизельного погрузчика. Это происходит вследствие меньшего времени цикла из-за более быстрой работы гидравлической системы электрической версии.

С учетом коэффициента использования рабочего времени ($K_3=0,53$), фактическая производительность дизельного погрузчика составляет $292,56 \text{ м}^3/\text{ч}$, в то время как у электрического погрузчика эта цифра выше – $331,51 \text{ м}^3/\text{ч}$.

При расчете выработки за смену в 12 часов дизельный погрузчик способен обеспечить перегрузку около 3510 м^3 материала, в то время как электрический погрузчик, учитывая все временные факторы (зарядка, перемещение к станции зарядки и обратно), может обработать фактически 3646 м^3 материала за смену.

В итоге электрический погрузчик проявляет чуть более высокую производительность, несмотря на необходимость траты времени на зарядку, что может быть решающим фактором при выборе оборудования, учитывая его эффективность и экономию времени работы.

Оценка энергоэффективности применения электрических погрузчиков по сравнению с дизельными в рамках имеющихся фактических данных предприятия показала их более высокую эффективность и производительность. Причем экспериментальные и расчетные данные были получены и подтверждены отчетными документами предприятия. Не смотря на необходимость зарядки аккумуляторных батарей и время автономной работы, не превышающее 8 часов, электрический погрузчик показал более высокие результаты по сравнению с дизельной версией. Однако необходимость зарядки и время автономной работы требуют изменения регламентов и технологий организации работ, особенно для предприятий с двухсменной работой и временем работы техники более 8 часов в день. Приведенные расчеты не учитывают итоговую стоимость эксплуатации по причине отсутствия данных о ресурсе, необходимости ремонтов и времени обслуживания и простоя электрических погрузчиков. В то время как для дизельных версий эти данные уже имеются. Кроме того, не учитывается необходимость приобретения, обслуживания зарядной инфраструктуры и необходимость утилизации аккумуляторных батарей [5].

В исследовании выявлено, что дизельные погрузчики потребляют от 8 до 17 литров топлива в час, средний расход при погрузке – 12,4 л/ч. Электрический погрузчик работает 7–8 часов, заряжается до 70 % за 45 минут, а его часовой расход электроэнергии составляет примерно 31 кВт·ч. Рекомендуется оптимизировать режимы работы дизельных погрузчиков, учитывая различия в энергопотреблении. Расчеты КПД показывают, что электрический погрузчик более эффективен, что может быть важным при выборе оборудования. Оптимизация работы при номинальной мощности и учет времени с минимальной нагрузкой

также могут повысить эффективность работы погрузчиков [6].

Для определения необходимой реакции системы на производимые водителем/оператором действия необходимо обозначить интервалы чувствительности для каждого из указанных выше событий. Наличие данных порогов позволяет в автоматизированном режиме производить оценку действий и определять совершение резких маневров, действий или иных событий, связанных с управлением техникой.

Литература

1. Смирнов, П. И. Использование телематических данных, получаемых от грузовых автомобилей, для прогнозного определения норм расхода топлива / П. И. Смирнов, А. П. Тимофеев, Ф. А. Новокшанов // Грузовик. – 2018. – № 12. – С. 32–37.

2. Чупков, В. А. Экспериментальная оценка влияния интенсивности ускорения на экономичность автомобиля / В. А. Чупков, Р. А. Малышев, И. Ф. Джафаров // XVI Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: Материалы Всероссийской научной конференции. В 3-х томах, Вологда, 29 ноября 2022 года / Главный редактор М.М. Караганова. Том 1. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2023. – С. 119–122.

3. Раков, В. А. Оценка эффективности эксплуатации автомобилей с комбинированной энергоустанов-

кой малой электрической мощности «Мягкий гибрид» / В. А. Раков // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 2(20). – С. 66–69.

4. Раков, В. А. Анализ приспособленности трансмиссии автомобиля к топливной экономичности ДВС / В. А. Раков, Н. Н. Трушин // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: материалы XVI Международной научно-технической конференции, Вологда, 08 декабря 2021 года. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. – С. 354–358.

5. Methodological approach to digitalization of management processes in automobile and road complex / A. V. Terentyev, M. Y. Karelina, A. A. Pavlovskaya [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года. Vol. 832. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012069. – DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012069.

6. V. Rakov, B. S. Subbotin, A. M. Ivanov, and A. Podgorny, “Stagnation in the development of internal combustion engines as a factor of transition to more perfect power units,” 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Mar. 2021, doi: 10.1109/ieecon51389.2021.9416056.

P.I. Smirnov

Vologda State University

COMPARISON OF EFFICIENCY OF ELECTRIC WHEEL LOADER AND DIESEL LOADER

Based on the data on the cost and potential harm to the road, a multi-criteria optimization problem is solved to select the optimal transport model. The modified method of searching for Pareto-optimal solutions is used as a mathematical method. The results of experimental studies of the influence of the parameters of the transportation process on the utilization factor of the load capacity are presented. The resulting mathematical optimization model is ready for integration into automated cargo transportation management systems and has a calculation error of up to 12.8 %.

Electric wheel loader; diesel wheel loader; energy consumption; zero emissions; lithium iron phosphate battery.