

УДК 629.365

DOI: 10.46960/2782-5477\_2022\_4\_51

К.Е. Бяков<sup>1</sup>, А.А. Стадухин<sup>2</sup>, Н.А. Мокрецов<sup>2</sup>  
**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ  
ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА**

<sup>1</sup> *Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова*

<sup>2</sup> *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

Для снижения затрат энергии погрузчика на выполнение наиболее часто встречающихся в эксплуатации рабочих циклов предлагается применить в его составе гибридную электромеханическую трансмиссию, выполненную по последовательной схеме (вместо традиционной гидромеханической трансмиссии). Сравнительная оценка энергоэффективности принятого решения проведена методом математического моделирования путем имитации движения рассматриваемого типа машин, оснащенных различными вариантами трансмиссий, в четырех характерных режимах работы. Также приведена оценка влияния на топливную экономичность использования накопителя электрической энергии в составе трансмиссии и реализации торможения погрузчика за счет генераторного режима работы тяговых электромашин. Установлено, что применение на фронтальном погрузчике гибридной электромеханической трансмиссии, выполненной по последовательной схеме, позволяет повысить его топливную экономичность в наиболее часто встречающихся режимах эксплуатации. Однако в некоторых режимах работы, характеризующихся малой скоростью и высокой потребной тягой, эффективность электромеханической трансмиссии может оказаться ниже, чем гидромеханической, за счет низкого коэффициента полезного действия электромашин в подобных условиях.

**Ключевые слова:** фронтальный погрузчик, тяговый электропривод, топливная экономичность, энергоэффективность, накопитель электрической энергии, рабочий цикл.

### Введение

Рабочий цикл фронтальных погрузчиков представляет собой выполнение различных технологических операций, связанных с многократными разгонами, торможениями, движением передним и задним ходом, с грузом и без груза. Такие операции на погрузчиках с гидромеханическими трансмиссиями вынуждают часто переключать передачи, работать с большим скольжением гидротрансформатора и использовать двигатель внутреннего сгорания в малоэффективных режимах работы. В случае оснащения фронтального погрузчика гибридной электромеханической трансмиссией, выполненной по последовательной схеме, становится возможным избежать подобных проблем и повысить топливную экономичность при выполнении технологических операций. В рамках статьи будет рассматриваться трансмиссия с одним механическим диапазоном; эта особенность, хотя и приводит к переразмериванию трансмиссии, но позволяет повысить удобство управления машиной [1].

Эффективность применения гибридной электромеханической трансмиссии (ЭМТ) дает возможность рационально оценивать путем сравнения расходов топлива на выполнение различных технологических операций для случая фронтального погрузчика, оснащенного в одном варианте классической гидромеханической трансмиссией (ГМТ), а в других – различными вариантами ЭМТ рассматриваемого типа. Указанное исследование выполняется на этапе разработки нового погрузчика, в связи с чем сравнительная оценка энергоэффективности проводится с помощью имитационного математического моделирования.

### Методика исследования

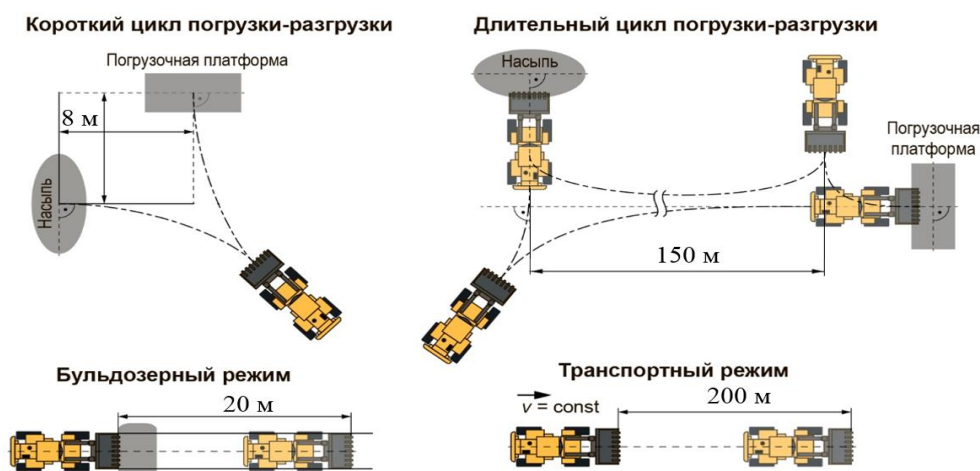
На основе анализа специфики применения фронтальных погрузчиков установлено, что наиболее широко используемым является погрузчик грузоподъемностью 3500 кг. В связи с этим, исходя из результатов исследований, проводимых совместно с ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» [1], для дальнейшего анализа энергоэффективности были сформированы следующие технические характеристики образца фронтального погрузчика (табл. 1).

**Таблица 1.**  
**Технические характеристики образца фронтального погрузчика**

Параметр	Значение
Масса снаряженная $m_{\text{снар}}$ , кг	10800
Масса полная $m$ , кг	14300
Свободный радиус колеса $r_0$ , м	0,655
Максимальная скорость машины $V_{\text{max}}$ , км/ч	40

Оценка топливной экономичности фронтального погрузчика проводилась для четырех характерных режимов работы, реализуемых при реальной эксплуатации: короткий цикл погрузки-разгрузки, длинный цикл погрузки-разгрузки, бульдозерование, транспортный режим (рис. 1). Данные режимы работы погрузчика являются наиболее часто встречающимися и сформированы на основании анализа литературных источников [2-5]. Программная реализация математической модели и имитация движения фронтального погрузчика осуществлялись в рамках программного комплекса автоматизированного анализа динамики систем тел. Имитационная модель погрузчика создана по методике, представленной в работе [6].

В рамках исследования при моделировании выполнения машиной заданных циклов работы (рис. 1.) учитывались как затраты энергии на движение, так и затраты на привод рабочего оборудования и поворот, осуществляемый за счет складывания шарнирно-сочлененной рамы погрузчика.



**Рис. 1. Траектория движения фронтального погрузчика при выполнении различных технологических циклов работы**

Траектория движения при выполнении каждого технологического цикла задавалась в виде сплайна, построенного по точкам, следование по которому обеспечивалось при помощи алгоритма, подробно описанного в работе [7]. На рис. 2 для примера показана траектория движения фронтального погрузчика при моделировании его работы на коротком цикле погрузки-разгрузки. Для описания условий движения каждому участку маршрута (по пройденному пути) ставились в соответствие требуемая скорость движения, положение рабочего оборудования, масса груза в ковше и дополнительное сопротивление движению, возникающее в случае набора ковша. На рис. 3 в качестве примера показаны указанные параметры, описывающие короткий цикл работы фронтального погрузчика. Так, короткий цикл можно разделить на четыре этапа: «движение к насыпи» (0-17 м), «движение от насыпи с грузом» (18-32 м), «движение к бункеру с грузом» (33-50 м), «движение от бункера» (51-68 м).

Аналогичным образом задавались параметры работы погрузчика и в других исследованных циклах.

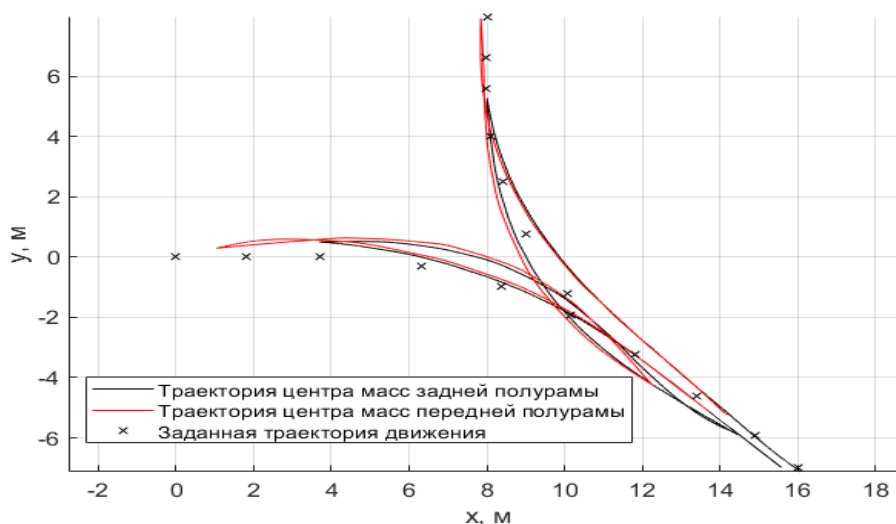


Рис. 2. Траектории точек корпуса фронтального погрузчика при моделировании короткого цикла работы

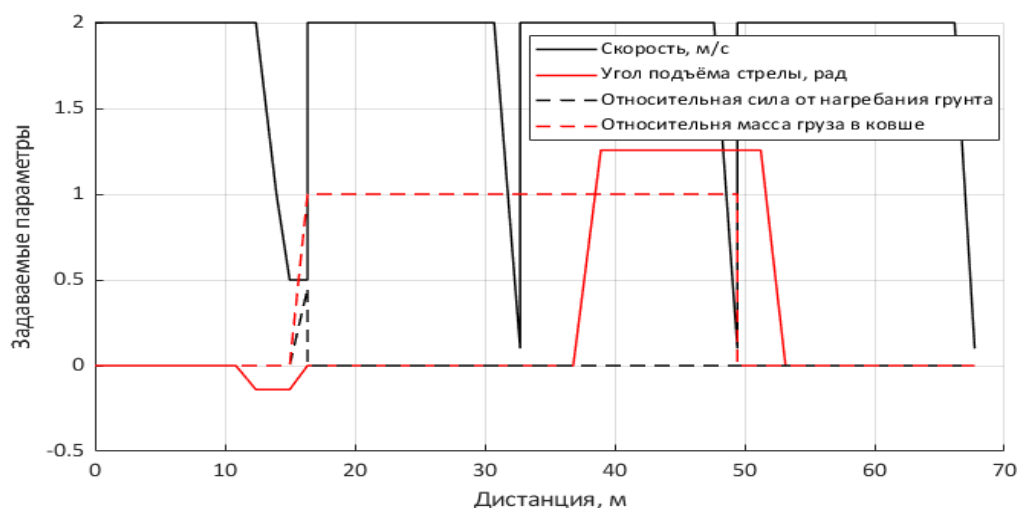
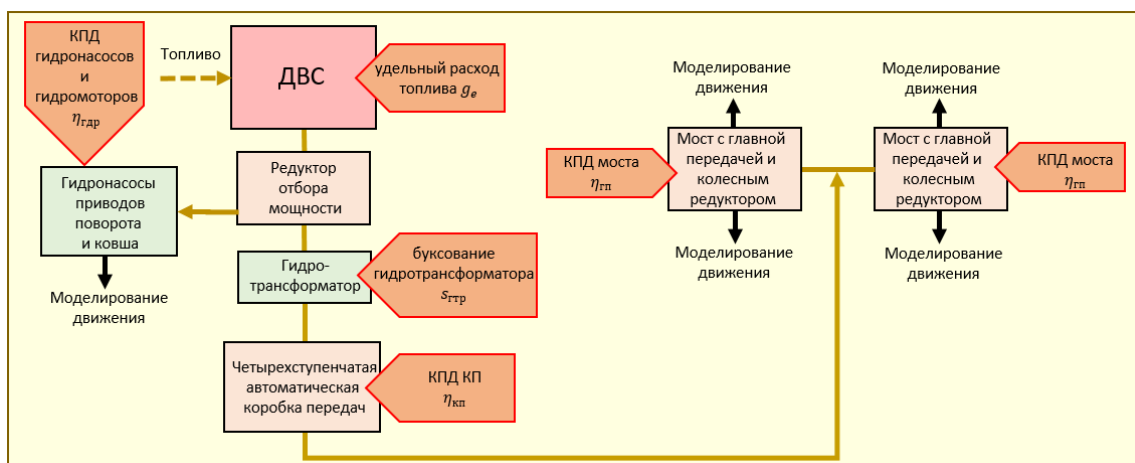


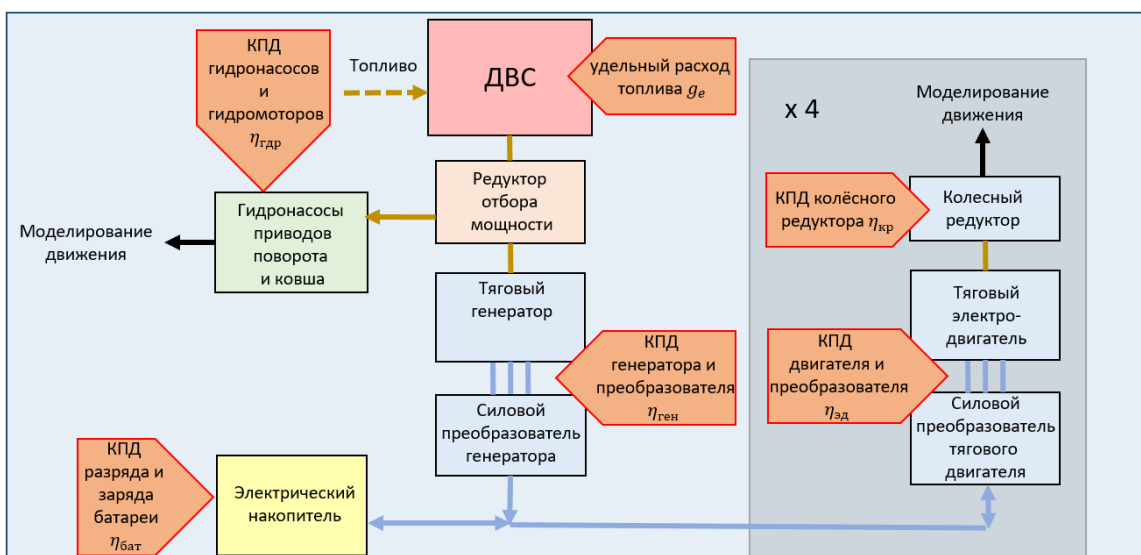
Рис. 3. Параметры, описывающие условия движения в коротком цикле работы фронтального погрузчика

Для корректной оценки энергоэффективности фронтальных погрузчиков, оснащенных различными вариантами привода, в рамках математической модели подробно описаны каждый из рассматриваемых вариантов трансмиссий с учетом потерь, возникающих на всех этапах преобразования энергии. Окончательно оценка энергоэффективности машины проводилась по расходу топлива двигателем внутреннего сгорания на выполнение каждого цикла работы. Схематичное изображение состава ГМТ с обозначением основных составляющих потерь энергии при движении машины приведено на рис. 4.

В данной работе в качестве ЭМТ фронтального погрузчика предлагается трансмиссия с индивидуальным приводом ведущих колес. Вся мощность, используемая для движения, вырабатывается одним электрическим генератором, который приводится от ДВС и питает четыре электродвигателя, вращающие каждое колесо (рис. 5). В ЭМТ может включаться накопитель электрической энергии, предназначенный для работы в качестве буфера и преодоления возможной несогласованности работы генератора и электродвигателей, а также для «смещения» режима работы ДВС в зону низкого удельного расхода топлива, что может повысить энергоэффективность.

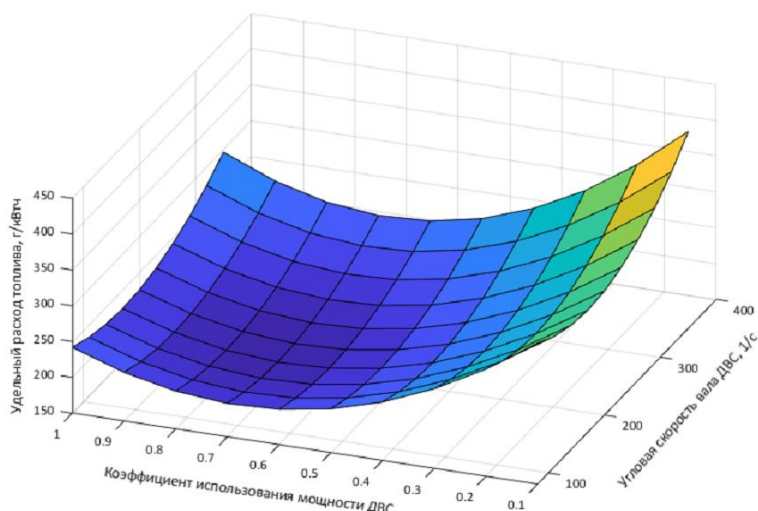


**Рис. 4. Состав гидромеханической трансмиссии фронтального погрузчика и обозначение основных составляющих потерь энергии**

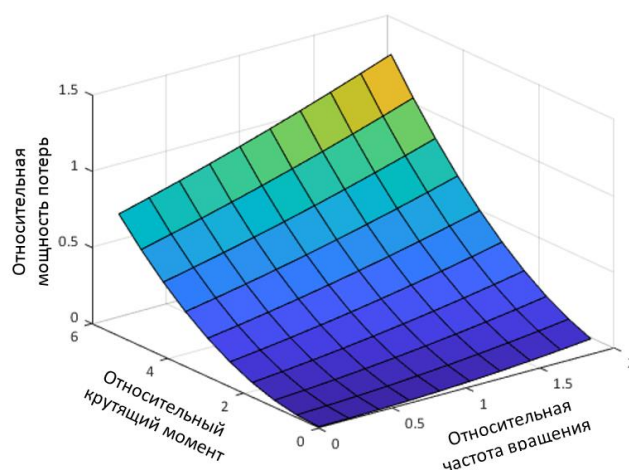


**Рис. 5. Состав электромеханической трансмиссии фронтального погрузчика и обозначение основных составляющих потерь энергии**

Для расчета количества топлива, затраченного на движение погрузчика, используется поверхность, описывающая зависимость удельного расхода топлива ДВС  $g_e$  от его частоты вращения и степени использования мощности (рис. 6). Построение указанной поверхности осуществлялось по приближенной методике И.С. Шлиппе [8]. Очевидно, что для обеспечения максимальной энергоэффективности необходимо обеспечить работу ДВС в режиме с минимальным удельным расходом топлива, при этом можно заметить (рис. 6), что влияние степени использования мощности на указанный параметр более существенно, чем влияние частоты вращения коленчатого вала (исходя из этого критерия, строится система управления ДВС в гибридной электромеханической трансмиссии, выполненной по последовательной схеме). Мощность потерь в электродвигателях и генераторе определялась по методике [9]. Она основывается на аппроксимации характеристик КПД существующих электродвигателей с помощью полинома. На рис. 7 представлен пример поверхности относительных потерь, полученной для тягового электродвигателя мощностью 73 кВт. В [9] показано, как из относительных величин с использованием точки номинального крутящего момента и скорости вращения вала определяются действительные для конкретного двигателя параметры.



**Рис. 6. Зависимость удельного расхода топлива двигателя внутреннего сгорания от режима работы**



**Рис. 7. Поверхность КПД тягового электродвигателя**

Потери в механических передачах и гидрообъемных приводах, а также при заряде и разряде накопителя электрической энергии описывались посредством назначения постоянных значений КПД. Основные параметры, описывающие потери в трансмиссии, представлены в табл. 2.

**Таблица 2.**  
**Параметры, описывающие потери в трансмиссии и необходимые для оценки топливной экономичности**

Параметр	Значение
Удельный расход топлива двигателя внутреннего сгорания, $g_e$ , г/кВт·ч	224
КПД механической части ГМТ (коробка передач, главная передача), $\eta_{кп} \cdot \eta_{гп}$	0,895
КПД механической части ЭМТ (планетарный колесный редуктор, $\eta_{кр}$ )	0,96
КПД гидронасосов, $\eta_{гн}$	0,75
КПД гидромоторов и гидроцилиндров, $\eta_{гдр}$	0,75
Максимальный КПД электродвигателя и генератора (с электрическими преобразователями), $\eta_{эд}$	0,94
КПД заряда и разряда накопителя электрической энергии, $\eta_{бат}$	0,99

### Сравнительная оценка топливной экономичности

При оценке влияния трансмиссии на топливную экономичность были выбраны следующие варианты исполнения привода фронтального погрузчика (табл. 3). В вариантах 1 и 2 мощность ДВС выбрана из условия возможности обеспечения выполнения тяжелой технологической операции – бульдозирования на скорости до 1 м/с. Варианты 3 и 4 предполагают использование накопителя электрической энергии в качестве буфера, что позволяет применить ДВС меньшей мощности, так как каждая операция некоторое время может выполняться за счет запасенной энергии.

Таблица 3.

Параметры исследуемых вариантов фронтального погрузчика

Номер	Обозначение	Мощность ДВС, кВт	Наличие накопителя электрической энергии
1	ГМТ 110	110	нет
2	ЭМТ 110	110	нет
3	ЭМТ 85	85	да
4	ЭМТ 105	105	да

Мощность каждого из четырех тяговых электродвигателей для всех вариантов трансмиссии назначена по результатам тягового расчета с учетом ограниченности диапазона существующих электромашин (невозможность обеспечения одной и той же электромашинной высокой скорости в одних режимах и высокой тяги в других [1]). Таким образом, в соответствии с работой [1] максимальная мощность каждой электромашинной получена на уровне 73 кВт. Динамические характеристики фронтальных погрузчиков, оснащенных представленными вариантами трансмиссий, изображены на рис. 8 (вариант 1, ГМТ) и рис. 9 (варианты 2 – 4, ЭМТ).

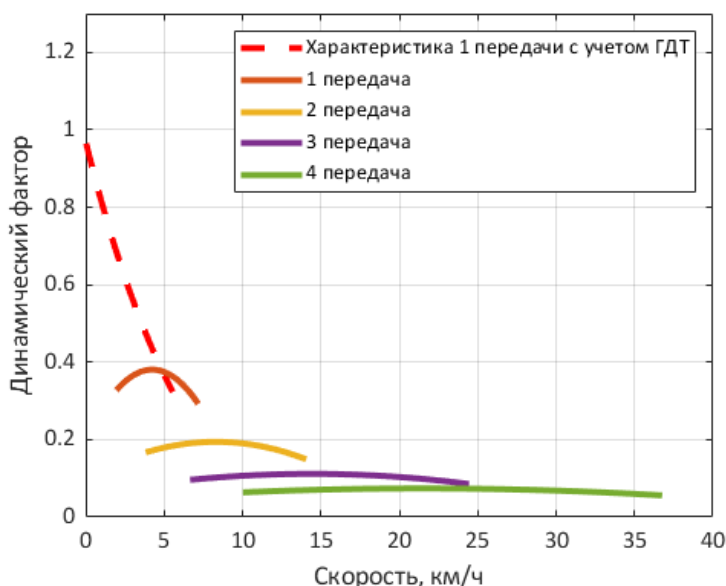


Рис. 8. Тягово-скоростная характеристика погрузчика с ГМТ

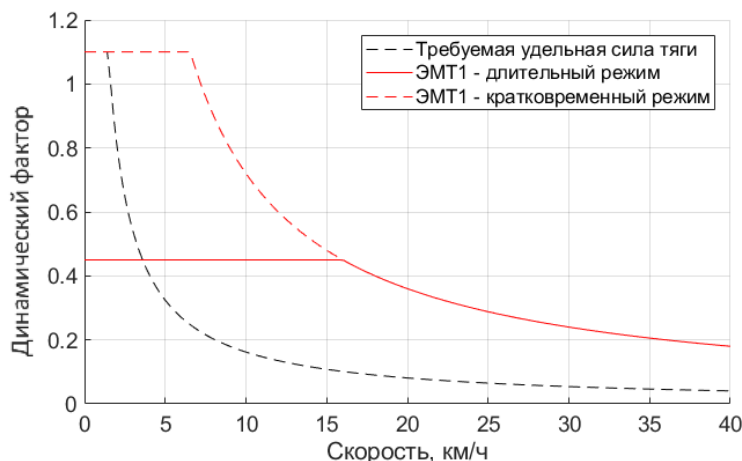


Рис. 9. Тягово-скоростная характеристика погрузчика с ЭМТ

Топливная экономичность фронтального погрузчика оценивается по расходу топлива ДВС при этом для удобства используется относительная величина, показывающая экономию топлива по отношению к расходу, обеспечиваемому погрузчиком с гидромеханической трансмиссией.

Относительная экономия топлива определяется по следующей формуле:

$$g_{\text{отн}} = \frac{g_{\text{ГМТ}} - g}{g_{\text{ГМТ}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $g_{\text{ГМТ}}$  – расход топлива фронтального погрузчика с гидромеханической трансмиссией в рассматриваемом цикле;  $g$  – расход топлива фронтального погрузчика с выбранной схемой трансмиссии в рассматриваемом цикле.

Для обеспечения корректного сравнения для каждого типа трансмиссии имитировались все четыре цикла работы фронтального погрузчика. При этом в рамках каждого цикла для трансмиссий обеспечивались одни и те же условия движения машины. Для всех рассматриваемых циклов работы, кроме транспортного, режим работы генератора в составе гибридной трансмиссии с накопителем электрической энергии подбирался таким образом, чтобы обеспечить нейтральный энергобаланс системы (одинаковый уровень заряда накопителя в начале и конце цикла). В транспортном режиме задаваемая угловая скорость коленчатого вала ДВС и степень использования мощности подбирались такими, чтобы вырабатываемой мощности было достаточно для движения указанных условиях без использования батареи. Таким же образом моделировалась трансмиссия без накопителя во всех режимах.

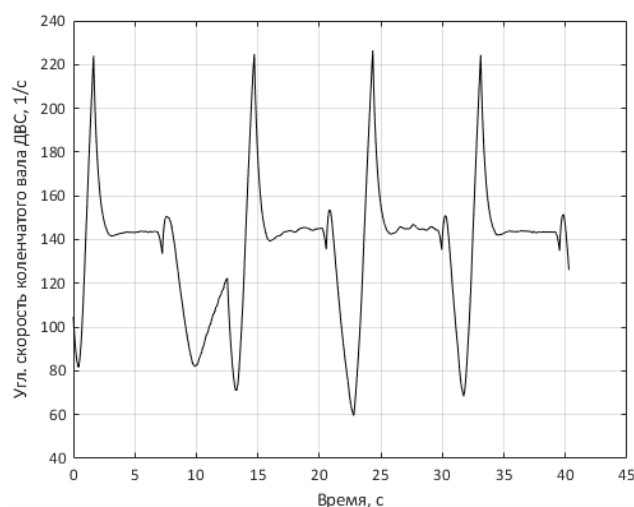
Полученные результаты по оценке затрат топлива в различных циклах работы рассматриваемых вариантов фронтальных погрузчиков представлены в табл. 4.

Таблица 4.

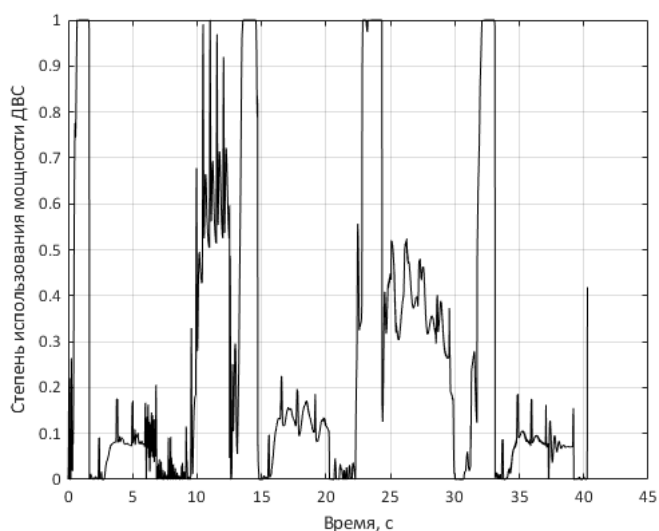
Результаты оценки затрат топлива ДВС погрузчика в каждом из ездовых циклов

Исполнение трансмиссии	Расход топлива, кг (относительная экономия топлива, %)			
	Бульдозирование	Короткий цикл	Длинный цикл	Транспортный режим
ГМТ 110	0,1284 ( 0 )	0,0637 ( 0 )	0,2246 ( 0 )	7,185 кг/ч ( 0 )
ЭМТ 110	0,1595 (24,22)	0,0530 (-16,79)	0,2253 (0,31)	7,151 кг/ч (-0,47)
ЭМТ 85	0,1376 (7,17)	0,0461 (-27,58)	0,1984 (-11,67)	6,430 кг/ч (-10,51)
ЭМТ 105	0,129 (0,47)	0,0468 (-26,5)	0,2023 (-9,93)	6,563 кг/ч (-8,66)

Как видно из табл. 4, в случае бульдозирования расход топлива ДВС при гибридных схемах трансмиссии превысил расход топлива погрузчика с ГМТ. Это связано с тем, что режим бульдозирования характеризуется низкой скоростью движения погрузчика с высокими требованиями по крутящему моменту на ведущих колесах. В таких условиях применяемые на транспорте электродвигатели имеют низкий КПД. Также для обеспечения двигателей энергией, потребной для выполнения указанной операции, ДВС гибридной трансмиссии вынужден работать в зоне высокого удельного расхода топлива. Также необходимо отметить, что при передаче большой мощности ЭМТ имеет меньшую эффективность, чем ГМТ, вследствие двойного преобразования энергии. В случае выполнения короткого цикла работы получен наибольший положительный эффект от применения гибридной электромеханической трансмиссии.



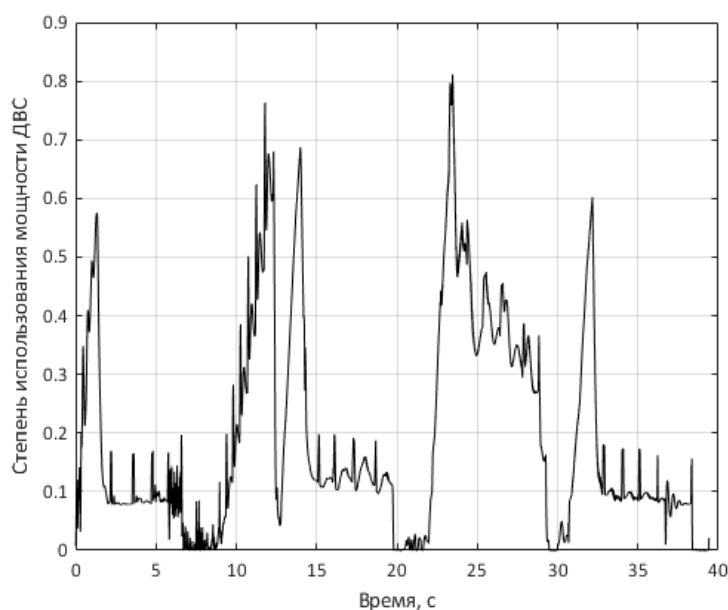
**Рис. 10. Зависимость угловой скорости коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания от времени моделирования в коротком цикле работы фронтального погрузчика с гидромеханической трансмиссией**



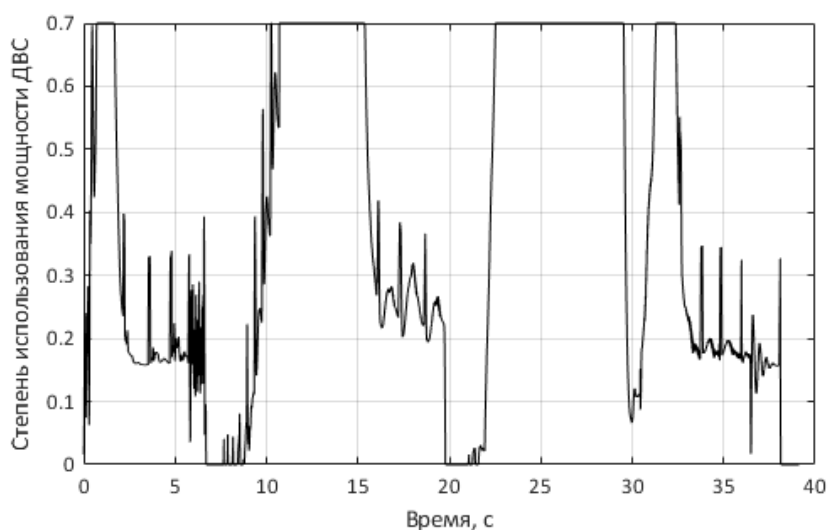
**Рис. 111. Зависимость степени использования мощности двигателя внутреннего сгорания от времени моделирования в коротком цикле работы фронтального погрузчика с гидромеханической трансмиссией**



На рис. 10 и 11 показаны результаты моделирования работы фронтального погрузчика с ГМТ в указанном цикле. Режим работы ДВС существенно меняется в зависимости от внешних условий в процессе движения по циклу, несмотря на работу гидротрансформатора и переключение передач, что приводит к частой работе ДВС с неоптимальным расходом топлива. В случае использования гибридной ЭМТ ведущие колеса кинематически не связаны с ДВС и последний может эксплуатироваться при постоянной угловой скорости коленчатого вала, обеспечивающей минимальное значение удельного расхода топлива. Результаты моделирования короткого цикла работы фронтального погрузчика с ЭМТ без накопителя электрической энергии представлены на рис. 12. Видно, что в данном случае мощность источника энергии регулируется степенью использования ДВС.



**Рис. 122.** Зависимость степени использования мощности двигателя внутреннего сгорания от времени моделирования в коротком цикле работы фронтального погрузчика с электромеханической трансмиссией без накопителя электрической энергии



**Рис. 133.** Зависимость степени использования мощности двигателя внутреннего сгорания от времени моделирования в коротком цикле работы фронтального погрузчика с электромеханической трансмиссией и накопителем электрической энергии

При наличии в составе ЭМТ накопителя электрической энергии можно использовать энергетическую установку в наиболее эффективном режиме как по угловой скорости, так и по степени использования мощности. Как видно из рис. 13 и 14, во избежание попадания ДВС в неэффективный режим работы (со слишком высокой степенью использования мощности) необходимая для движения мощность дополнительно обеспечивалась накопителем электрической энергии. При снижении потребляемой мощности ТЭД заряд накопителя восстанавливается, также обеспечивая загрузку ДВС в наиболее эффективном режиме. С целью увеличения ресурса батареи зарядка прекращалась при достижении степени заряда 0,8, в следствии чего степень использования мощности использования ДВС снижалась (рис. 14).

Необходимо отметить, что исполнение трансмиссии «ЭМТ 85» показало наибольшую топливную экономичность. ДВС других вариантов ЭМТ вынуждены были работать на угловых скоростях вращения коленчатого вала, для которых характерен более высокий удельный расход топлива вследствие переразмеренности двигателя по номинальной мощности. В длинном цикле работы погрузчика схемы трансмиссии с накопителем энергии также показывают большую топливную экономичность по сравнению с ГМТ. Это связано с возможностью запастись энергией во время перегонов погрузчика между пунктами загрузки и разгрузки. Накопленная энергия может использоваться в случае нехватки вырабатываемой генератором мощности во время энергоемких операций цикла.

В транспортном режиме для трансмиссий с накопителем энергии тенденция сохраняется. Необходимая для движения мощность обеспечивается двигателем при благоприятных условиях его работы, что обуславливает низкое потребление топлива. Для исполнения «ЭМТ 110» также характерна более высокая экономичность, обусловленная работой ДВС ЭМТ в режиме наименьшего расхода топлива.

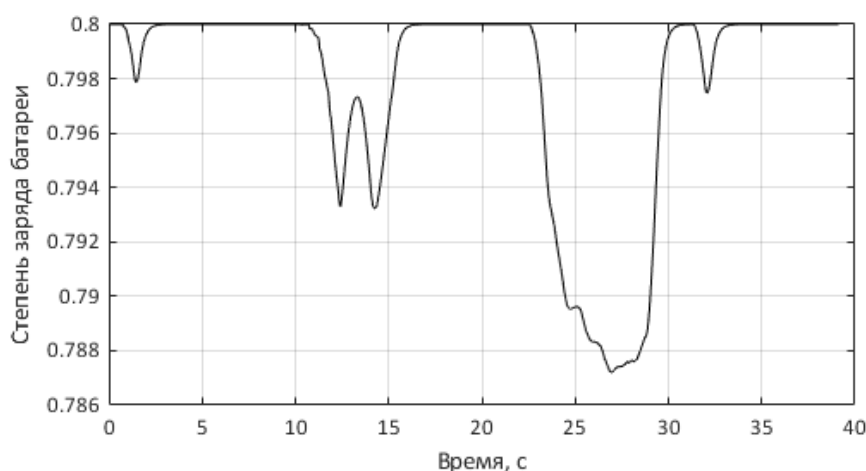


Рис. 14. Зависимость степени заряда накопителя электрической энергии от времени моделирования в коротком цикле работы фронтального погрузчика

### Влияние рекуперации на топливную экономичность погрузчика

Возможность некоторых электродвигателей работать в режиме генератора можно использовать для рекуперативного торможения, при котором часть кинетической энергии движения машины может быть преобразована в электрическую энергию. Таким образом, при торможении часть энергии, затраченной на разгон погрузчика, можно «возвратить» в накопитель электрической энергии.

Наиболее сильно влияние рекуперативного торможения на топливную экономичность погрузчика проявляется при рассмотрении длинного цикла погрузки-разгрузки, для которого характерно интенсивное торможение перед погрузочной платформой после движения с

большой скоростью на перегоне. В табл. 5 представлены результаты моделирования длинного цикла работы погрузчика с гибридной схемой трансмиссии, включающую накопитель электрической энергии.

**Таблица 5.**  
**Влияние рекуперации на расход топлива**  
**в длинном цикле погрузки-разгрузки фронтального погрузчика**

Исполнение трансмиссии	ЭМТ 85	ЭМТ 85 + рекуперация	ЭМТ 105	ЭМТ 105 + рекуперация
Расход топлива, кг	0,1984	0,1893	0,2023	0,1888

Как видно из табл. 5, для исполнения «ЭМТ 85» применение рекуперативного торможения позволяет сократить расход топлива при выполнении длинного цикла на 4,6 %, а для варианта «ЭМТ 105» – на 6,7 %.

### Выводы

Установлено, что схемы ЭМТ, оснащенные накопителем электрической энергии, позволят снизить расход топлива фронтального погрузчика за счет возможности обеспечения работы ДВС в режиме с низким удельным расходом топлива. При избыточной генерации электрической энергии во время движения в условиях слабого сопротивления неиспользуемая энергия запасается в электрический накопитель. В тяжелых условиях работы недостаток вырабатываемой генератором мощности также компенсируется с помощью накопителя электрической энергии. Моделирование доказывает эффективность рассмотренных вариантов ЭМТ с точки зрения сокращения топливных затрат погрузчика.

На топливную экономичность погрузчика влияет распределение количества операционных циклов в течении рабочей смены. Так, при выполнении погрузчиком операций короткого цикла относительная экономия топлива для случая электромеханической схемы трансмиссии «ЭМТ 85» достигает максимального значения 27,6 % (по отношению к гидромеханической трансмиссии). Соответственно, чем больше коротких циклов совершает погрузчик с ЭМТ за рабочую смену, тем дешевле его эксплуатация с точки зрения расхода топлива по сравнению с погрузчиком с традиционной схемой трансмиссии. При этом относительная экономия несколько снижается при работе погрузчика по длинному циклу или в транспортном режиме: 11,7 и 10,5 % соответственно для схемы трансмиссии «ЭМТ 85». При моделировании бульдозирования все модели электромеханических погрузчиков показали повышенный расход топлива относительно традиционной схемы трансмиссии. Так, погрузчик «ЭМТ 110» показал относительно превышение топливных затрат на 24 %.

Необходимо отметить, что рекуперативное торможение обеспечивает дополнительное сокращение топливных затрат на величину до 6,7 % при выполнении длинного цикла погрузки-разгрузки. Однако эффект рекуперации практически не проявляется в других технологических операциях, которые составляют значительную долю времени функционирования погрузчика. Также необходимо иметь в виду, что использование системы рекуперации вводит дополнительные требования к агрегатам ЭМТ. Эти обстоятельства не позволяют получить значительного сокращения расхода топлива путем рекуперации энергии на практике, в связи с чем ввод системы рекуперации в трансмиссию погрузчика может быть нецелесообразен.

*Исследования выполнены ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» по договору № 517-21 от 22 апреля 2021 г. при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по теме «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом» Соглашения № 075-11-2021-051 от 24 июня 2021 г.*

**Библиографический список**

1. Горелов В.А. Метод определения параметров электромеханической трансмиссии фронтального погрузчика. Тракторы и сельхозмашины [Текст] / В.А. Горелов, Б.Б. Косицын, А.А. Стадучин, О.И. Чудаков. – М., 2021. Вып. № 5. С. 38-45.
2. Wang F. Investigation on the energy management strategy for hydraulic hybrid wheel loaders [Текст] / F. Wang, M.A. Mohd Zulkefli, Z.Sun, K.A. Stelson // ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference, 2013; Vol. 1.
3. Vännström, J. Educational Interface for Reducing Fuel Consumption [Текст] / J. Vännström, S. Lindholm // Master thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2007.
4. Zhang, R. Multivariable Control of an Earthmoving Vehicle Powertrain Experimentally Validated in an Emulated Working Cycle [Текст] / R. Zhang, A.G. Alleyne, D.E. Carter // Conference paper, ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2003.
5. Gottschalk, M. Test Method for Evaluating the Energy Efficiency of Wheel Loaders [Текст] / M. Gottschalk, G. Jacobs, A. Kramer // ATZ offhighw worldw 11, p.44–49. 2018. <https://doi.org/10.1007/s41321-018-0008-0>.
6. Горелов, В.А. Оценка показателей криволинейного движения автопоезда с помощью имитационного математического моделирования [Текст] / В.А. Горелов, К.Б. Евсеев, О.И. Чудаков, К.С. Балковский // Известия МГТУ «МАМИ». – М., 2020. Вып. № 4 (46). С. 2-16.
7. Евсеев, К.Б. Синтез закона управления поворотом двухшарнирного гусеничного поезда для обеспечения следования заданной траектории [Текст] // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. Вып. № 3 (66). С. 67- 75.
8. Проектирование полноприводных колесных машин: учебник для вузов: В 3 т. [Текст] / А.А. Полунгян [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. Т. 1. – 528 с.
9. Падалкин. Б.В. Метод оценки эффективности применения электромеханических трансмиссий транспортных средств на этапе проектирования [Текст] / Б.В. Падалкин, В.В. Иваненков, Б.Б. Косицын, А.А. Стадучин, К.С. Балковский // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. Вып. № 2 (44). С. 58-67. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-44-2-58-68.