

С.А. Голякевич

**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСОВ
МНОГООПЕРАЦИОННЫХ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Введение. Разнообразие условий и видов рубок леса в Республике Беларусь обуславливает широкую номенклатуру многооперационных лесозаготовительных машин (МЛМ) для их проведения. Реализация полного технологического цикла по получению древесного сырья требует применения сразу нескольких машин. При их выборе принято [Макуев, 2010; Матвейко и др., 2013] соблюдать принципы технологической совместимости, кратности производительности, унифицированности конструкций машин и т. д. Это обеспечивает возможность совместной работы машин и основу для сокращения эксплуатационных издержек. Выборочно перечисленные принципы учитываются при проектировании отдельных МЛМ и их технологических процессов. Однако оценка показателей совместной работы машин в комплексе МЛМ дается только на этапе опытной эксплуатации.

Потенциал роста эффективности лесозаготовок заключается в совместной разработке машин в комплексах МЛМ и технологических процессов их применения для целевых природно-производственных условий. Однако это требует создания методики прогнозирования, которая чувствительна к изменению технических параметров машин, условий работы и параметров технологического процесса.

Материалы и методика исследования.

При разработке методики учтено, что:

- оценка должна производиться в том числе на ранних стадиях проектирования, когда использование экономических показателей [Суханов и др., 2013; Soman et al., 2020; Askerman et al., 2022] приводит к затруднениям в получении исходных данных, что часто делает их некорректными и увеличивает общую ошибку оценки;
- исходные данные для проведения оценки должны определяться на основе математического моделирования [Емтыль и др., 2011; Голякевич, 2013];

- для сопоставления экспериментальной и теоретической оценок они должны быть измеряемыми при реальной эксплуатации [Рукомойников, Купцова, 2020];
- оценка должна комплексно учитывать величины, используемые в расчете единичных показателей эксплуатационной эффективности (производительности) [Сюнёв и др., 2008; Герасимов и др., 2012; Irousek et al., 2007], эксплуатационной надежности [Мохирев и др., 2022], энергоемкости [Букалов, 2009; Якимович, Ефимов, 2020] и т. д.), а также учитывать ограничения возможных условий эксплуатации.

Для учета изложенных требований использован критерий удельного ЭПП (УЭПП), изложенный в более ранней авторской работе [Голякевич, 2013]. Он получил дальнейшее развитие с целью обеспечения возможности оценки эффективности не только отдельных МЛМ, но и их комплексов с учетом стохастичности эксплуатационных условий и вариативности технологических процессов. Для его определения используются величины: полезно выполненной работы (Дж, м³ и т. д.), затраченной энергии (Дж, кг топлива и т. д.) и времени (с, смена и т. д.), которые входят в состав единичных показателей эксплуатационной эффективности и могут быть получены как на основе математического моделирования, так и в ходе реальной эксплуатации машин. Внедрение учета времени простоев машин в ремонтах позволило интегрально оценить влияние конструкторских и технологических решений на изменение баланса «производительность–энергопотребление–эксплуатационная надежность». Дополнительно учтено, что начало работы харвестера и форвардера происходит с некоторым «смещением» по времени, продолжительность которого достаточна для формирования запаса лесоматериалов харвестером и соблюдения безопасного расстояния между машинами. С учетом указанных особенностей критерий УЭПП_к (Вт) для комплекса МЛМ, работающего в стохастически распределенных эксплуатационных условиях, имеет вид (1):

$$УЭПП_{к} = \sum_{d=1}^m \sum_{f=1}^r \frac{\left(\sum_{i=1}^n A_i \right)^2 \cdot B(d) \cdot C(f)}{\left(\sum_{i=1}^n E_i \right) \left(\frac{T_{\Phi} + \Delta T_{X\Phi}}{D(t)} \right)}, \quad (1)$$

где d, m – порядковый номер и общее количество совокупностей таксационных характеристик древостоя; f, r – порядковый номер и общее количество совокупностей условий движения; n – общее количество машин комплекса, шт.; A_i – полезная работа, выполненная i -й машиной комплекса, Дж; E_i – энергия, затраченная i -й машиной комплекса для выполнения полезной

работы A_i , Дж; $B(d)$ – парциальный коэффициент, учитывающий вероятность эксплуатации машины в древостое с заданной совокупностью таксационных показателей; $C(f)$ – парциальный коэффициент, учитывающий вероятность эксплуатации машины в заданной совокупности условий движения; T_Φ – время выполнения технологических операций форвардером, с; $\Delta T_{X\Phi}$ – время, прошедшее от момента начала работы харвестера до момента начала работы форвардера, с; $D(t)$ – парциальный коэффициент, учитывающий вероятность нахождения комплекса машин в работе.

Энергия, затраченная форвардером для выполнения всей полезной работы, определяется зависимостью:

$$E_\Phi = \left(E_{X\Phi} + E_{P\Phi} + E_{\text{пер}\Phi} + \sum_{k_{гс}=1}^{n_{гс}} E_{\text{Пкгс}} n_{\text{Пкгс}} + \sum_{k_{гс}=1}^{n_{гс}} E_{\text{Ркгс}} n_{\text{Ркгс}} \right) n_{\text{тц}\Phi}, \quad (2)$$

где $n_{\text{тц}\Phi}$ – количество технологических циклов работы форвардера на лесосеке; E_Φ – общие энергозатраты на выполнение технологических операций форвардером, Дж; $E_{X\Phi}$ – энергозатраты на порожнее передвижение форвардера при среднем расстоянии вывозки $L_{\text{дв}\Phi}/2n_{\text{тц}\Phi}$, Дж; $E_{P\Phi}$ – энергозатраты на грузовое передвижение форвардера при среднем расстоянии вывозки $L_{\text{дв}\Phi}/2n_{\text{тц}\Phi}$, Дж; $E_{\text{пер}\Phi}$ – энергозатраты на передвижение форвардера на расстояние $L_{\text{пер}\Phi}$ при наборе пачки, Дж; $n_{\text{Пкгс}}$ – количество циклов погрузки пачек лесоматериалов каждой из $n_{гс}$ групп сортировки; $k_{гс}$ – номер группы сортировки лесоматериалов, для которой производится расчет; $n_{\text{Ркгс}}$ – количество циклов разгрузки пачек лесоматериалов каждой из $n_{гс}$ групп сортировки; $E_{\text{Пкгс}}$ – энергозатраты на погрузку манипулятором одной пачки лесоматериалов $k_{гс}$ -й группы сортировки, удаленной от оси поворота манипулятора на расстояние $l_{\text{фПкгс}}$, Дж; $E_{\text{Ркгс}}$ – энергозатраты на разгрузку манипулятором одной пачки лесоматериалов $k_{гс}$ -й группы сортировки из грузовой платформы форвардера в штабель на расстояние $l_{\text{фРкгс}}$ от оси поворота манипулятора, Дж.

$$E_X = E_{\text{пер}X} n_{гсX} + \sum_{i=1}^{n_{\text{ствл}}} E_{\text{Нави}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{ствл}}} E_{\text{Поди}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{ствл}}} E_{\text{Ви}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{ствл}}} E_{\text{Оси}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{ствл}}} \sum_{j_{\text{м}}=1}^{n_{\text{лм}}} E_{\text{РК}j_{\text{лм}}}, \quad (3)$$

где E_X – общие энергозатраты на выполнение технологических операций харвестером, Дж; $E_{\text{пер}X}$ – энергозатраты на передвижение харвестера между технологическими стоянками при среднем расстоянии между ними $l_{\text{пер}X}$, Дж; $E_{\text{Нави}}$, $E_{\text{Поди}}$ – энергозатраты на наведение харвестерной головки манипулятором на i -е дерево и его подтаскивание к месту раскряжевки на расстояние $\Delta l_{\text{ман}i}$ и угол $\Delta \alpha_{\text{ман}i}$ от начальных положений, соответствующих координатам растущих деревьев X_i и Y_i и координатам мест раскряжевки $X_{\text{раскр}}$ и $Y_{\text{раскр}}$

относительно оси поворота манипулятора соответственно, Дж; E_{Vi} – энергозатраты на валку i -го дерева с учетом его натяга, создания валочного момента и спиливания, Дж; E_{Oci} – энергозатраты на обрезку сучьев с i -го дерева в месте раскряжевки с координатами $x_{раскр}$ и $у_{раскр}$, Дж; E_{PKjLM} – энергозатраты на раскряжевку i -го дерева на n_{LM} -е количество лесоматериалов длиной l_{LM} каждый и диаметром в месте пропила, Дж; $n_{ствл}$ – количество стволов деревьев, заготавливаемых на одной лесосеке; $n_{лм}$ – количество сортиментов, выпиливаемых из одного ствола; $n_{тсх}$ – общее количество технологических стоянок харвестера.

Время выполнения операций в технологическом цикле работы форвардера определяется зависимостью:

$$T_{\Phi} = \left(T_{хх\Phi} + T_{рх\Phi} + T_{пер\Phi} + \sum_{k_{гс}=1}^{n_{гс}} T_{Пкгс} n_{Пкгс} + \sum_{k_{гс}=1}^{n_{гс}} T_{Ркгс} n_{Ркгс} \right) n_{тц\Phi}, \quad (4)$$

где T_{Φ} – время выполнения операций форвардером, с; $T_{хх\Phi}$ – время передвижения порожнего форвардера на среднем расстоянии вывозки $L_{дв\Phi}/2n_{тц\Phi}$, с; $T_{рх\Phi}$ – время передвижения груженого форвардера на среднем расстоянии вывозки $L_{дв\Phi}/2n_{тц\Phi}$, с; $T_{пер\Phi}$ – время передвижения форвардера при наборе пачки на расстояние $L_{пер\Phi}$, с; $T_{Пкгс}$ – время погрузки одной пачки лесоматериалов $k_{гс}$ -й группы сортировки при начальном вылете манипулятора $l_{Фркгс}$, с; $T_{Ркгс}$ – время разгрузки одной пачки лесоматериалов $k_{гс}$ -й группы сортировки из грузовой платформы форвардера в штабель при конечном вылете манипулятора $l_{Фркгс}$, с.

Харвестер выполняет всю работу на лесосеке за время T_X :

$$T_X = T_{перX} n_{тсX} + \sum_{i=1}^{n_{ствл}} T_{Навi} + \sum_{i=1}^{n_{ствл}} T_{Подi} + \sum_{i=1}^{n_{ствл}} T_{Vi} + \sum_{i=1}^{n_{ствл}} T_{Oci} + \sum_{i=1}^{n_{ствл}} \sum_{j_{лм}=1}^{n_{лм}} T_{PKjLM}, \quad (5)$$

где T_X – общие затраты времени на выполнение технологических операций харвестером, с; $T_{перX}$ – затраты времени на передвижение харвестера между технологическими стоянками при среднем расстоянии между ними $l_{перX}$, с; $T_{Навi}$, $T_{Подi}$ – затраты времени на наведение харвестерной головки манипулятором на i -е дерево и его подтаскивание к месту раскряжевки на расстояние $\Delta l_{манi}$ и угол $\Delta \alpha_{манi}$ от начальных положений, соответствующих координатам растущих деревьев X_i и Y_i и местам раскряжевки $x_{раскр}$ и $у_{раскр}$, соответственно, с; T_{Vi} – затраты времени на валку i -го дерева с учетом его натяга, создания валочного момента, спиливания и падения, с; T_{Oci} – затраты времени на обрезку сучьев с i -го дерева в месте раскряжевки с координатами $x_{раскр}$ и $у_{раскр}$, с; T_{PKjLM} – затраты времени на раскряжевку i -го дерева на количество $n_{лм}$ лесоматериалов длиной $l_{лм}$ каждый и диаметром ствола в месте пропила, с.

В настоящей статье затраты времени и энергии на выполнение операций, входящие в выражения (2–5), определялись с использованием авторских математических моделей технологического процесса [Голякевич, Гороновский, 2024a] и динамики манипулятора [Голякевич, Гороновский, 2024b].

Для расчета УЭПП_к работа комплекса машин схематизировалась в виде серии графиков энергопотребления отдельных машин за весь период выполнения полезной работы (рис. 1а, б). Период работы ограничивался запасом древесины на отдельной лесосеке. Следует отметить, что момент начала работы форвардера на лесосеке смещен относительно харвестера (Зона I на рис. 1б). Оно возникает ввиду необходимости формирования безопасного расстояния между машинами. Харвестер – как правило, более производительная машина, что в совокупности с отмеченным технологическим смещением приводит к скорейшему выполнению им работы на лесосеке и вызывает его простой в конце ее освоения. Однако при рассмотрении харвестера и форвардера как единого технологического комплекса МЛМ общее время их совместной работы $T_{\text{общ}}$ рассчитывается от начала работы харвестера до окончания работы форвардера (рис. 1с).

Экспериментальные исследования показывают, что значительное влияние на эффективность машин оказывают межоперационные интервалы. Их продолжительность свидетельствует не только об уровне концентрации внимания оператора, но и о технической возможности перехода к следующей операции по завершении предыдущей. Возможно несколько подходов к определению критерия УЭПП_к. Если оценка дается только техническим возможностям машин, то временные и энергетические затраты на межоперационных интервалах исключаются из рассмотрения. Тем самым не учитывается влияние квалификации операторов. Однако если оценка дается всему технологическому процессу, то данные затраты учитываются.

Время проведения технических обслуживаний и ремонтов следует учитывать в общей продолжительности работ $T_{\text{общ}}$ в том случае, если необходимо оценить влияние эксплуатационной надежности на величину эффективности комплекса. Для такого учета используется парциальный коэффициент вероятности нахождения комплекса МЛМ в работе $D(t)$.

Совокупное энергопотребление комплекса машин за весь период оценивалось как интеграл мощности, реализуемой на интервале времени от начала работы харвестера до окончания работы комплекса $T_{\text{общ}}$ (рис. 1с).

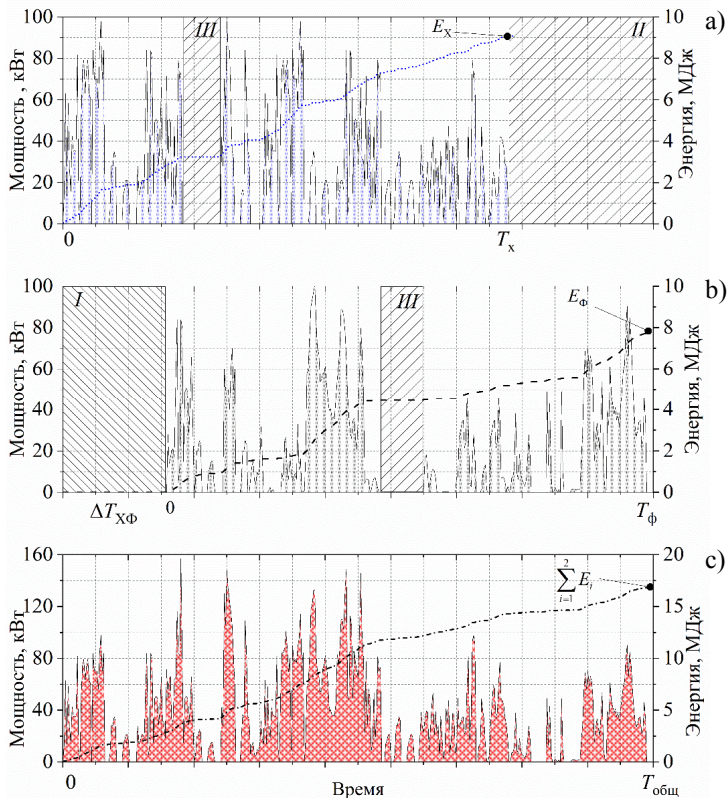


Рис. 1. Схематизация энергопотребления харвестера (а), форвардера (б) и комплекса машин «харвестер+форвардер» (с)

I – простой форвардера в начале освоения лесосеки для формирования харвестером безопасного расстояния между машинами; *II* – простой харвестера по окончании работы вследствие несоответствия показателей производительности машин комплекса и технологического сдвига сроков начала их работы; *III* – простои машин комплекса, связанные с их техническим обслуживанием или ремонтом

Fig. 1. Schematic representation of the power consumption of the harvester (a), forwarder (b), and the «harvester + forwarder» machine complex (c)

I – idle time of the forwarder at the beginning of the felling area development to allow the harvester to establish a safe distance between the machines; *II* – idle time of the harvester upon completion of work due to a mismatch between the productivity indicators of the machine complex and the technological shift in their work start times; *III* – idle time of the machines in the complex related to their maintenance or repair

Предложенный критерий применим не только к комплексам машин, но и к отдельным машинам, а также их технологическому оборудованию и конкретным технологическим операциям. В этих случаях следует учитывать соответствующие временные и энергетические затраты и именовать критерий «удельным энергетическим потенциалом производительности конкретной машины» (УЭПП_х, УЭПП_ф) или, в случае рассмотрения отдельной операции, «частным энергетическим потенциалом производительности ЧЭПП на заданной операции», к примеру, на обрезке сучьев (ЧЭПП_{ос}).

В зависимости от наличия исходных данных оценка энергозатрат может вестись для разных этапов (уровней) преобразования энергии:

- на уровне двигателя, где они выражаются в виде расхода топлива. Здесь учитываются технологические и организационные факторы, квалификация оператора, характеристики двигателя, привода и систем управления;
- на уровне выходов из источников гидравлической энергии, что исключает учет режимов работы двигателя и дополнительных потребителей;
- на уровне конечных гидравлических потребителей, что исключает учет потерь гидравлической энергии в приводе и режимов управления ими. При этом продолжают учитываться характеристики технологического оборудования, технология, способы и приемы выполнения операций.

В качестве косвенной оценки полезной работы вместо физической величины (Дж) использован объем древесины (m^3), над которым выполнены соответствующие технологические действия. При этом сопоставление разных вариантов выполнения операций допускалось только при равных физических величинах полезно выполняемой работы (Дж).

Результаты исследований и обсуждение. С использованием предложенной методики проведен анализ эффективности наиболее распространенных в Республике Беларусь комплексов МЛМ и отдельно форвардеров. При анализе погрузочных операций форвардера учтено влияние концентрации круглых лесоматериалов, а также 3 варианта взаимного расположения на лесосеке технологического коридора, лесоматериалов и порубочных остатков:

- лесоматериалы и порубочные остатки расположены вдоль технологического коридора у его края (рис. 2а, А₁);
- лесоматериалы расположены у края волока под углом 70–120° к его продольной оси, а порубочные остатки – на технологическом коридоре (рис. 2а, А_{II});
- порубочные остатки расположены вдоль края технологического коридора, лесоматериалы находятся позади порубочных остатков под углом около 70–120° к продольной оси коридора (рис. 2а, А_{III}).

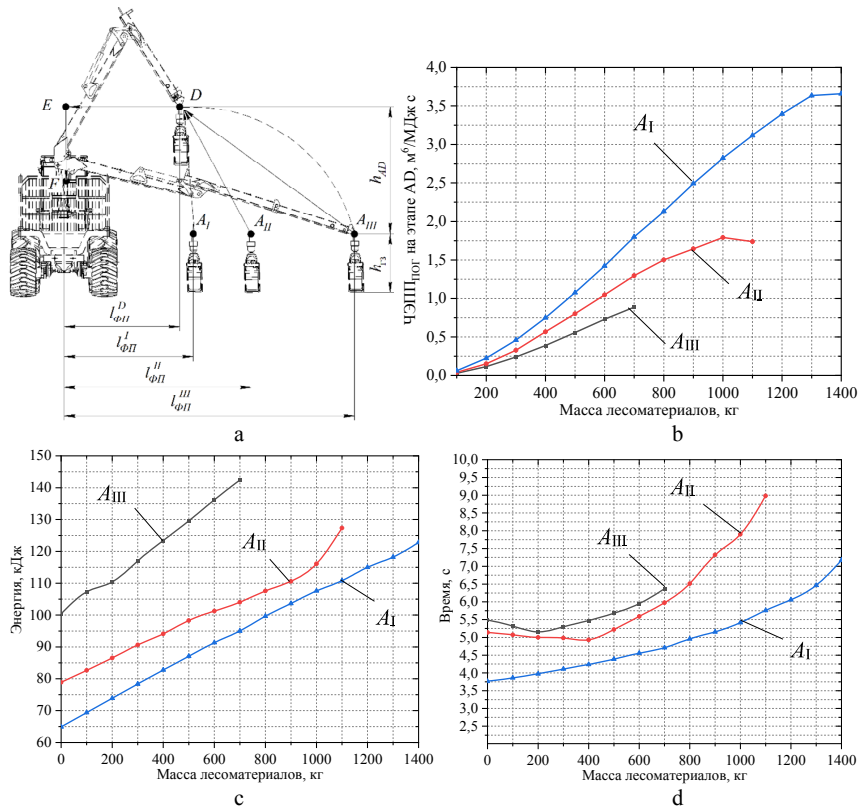


Рис. 2. Оценка эффективности этапа погрузки для участка A_iD : а – схема начальных (A_i , A_{ii} , A_{iii}) и общих (D , E , F) положений грейферного захвата в соответствии с типовыми технологическими процессами; б – частный энергетический потенциал производительности погрузки одной пачки лесоматериалов (с совмещением работы звеньев манипулятора) на этапе A_iD ; в, г – затраты, соответственно, энергии и времени на перемещение пачек круглых лесоматериалов манипулятором

Fig. 2. Efficiency assessment of the A_iD loading stage: а – diagram of initial (A_i , A_{ii} , A_{iii}) and general (D , E , F) positions of the grapple attachment in accordance with standard technological processes; б – specific energy productivity potential for loading a single bundle of forest materials (with combined operation of manipulator links) at stage A_iD ; в, г – respectively, energy and time costs for moving bundles of roundwood by the manipulator

В первом варианте (рис. 2а, б, A_i) длина горизонтальной проекции манипулятора форвардера от вертикальной оси его поворота до геометрического центра пачки лесоматериалов составляет 3,8–4,3 м, во втором (рис. 2а, б, A_{ii})

– 5,6–6,2 м, а в третьем (рис. 2а, б, А_{III}) – 7,5–8,0 м. Исследованиями установлено, что при наборе пачки лесоматериалов манипулятор форвардера находится в данных позициях с вероятностью 0,935, 0,861 и 0,902 соответственно.

Для последующего анализа погрузочных операций в качестве базовых приняты характеристики форвардера Амкодор 2661-01 с установленным манипулятором Kesla 600. С целью оценки эффективности режимов проведения погрузочных операций при различных вариантах размещения круглых лесоматериалов погрузка осуществлялась с общего горизонтального уровня, соответствующего опорной поверхности (рис. 2а, точки A_i).

Для учета микрорельефа местности, возможностей свободной упругой деформации звеньев манипулятора, его привода и колес форвардера допускалось перемещение погружаемой пачки лесоматериалов вниз относительно начальной точки A_i на величину до 0,8 м. Для варианта III телескопическое звено сокращалось в первую очередь. Далее для всех вариантов производился подъем лесоматериалов выше верхнего уровня стоек коников с параллельным сокращением вылета манипулятора до уровня $l_{\text{ман}} = 3,25$ м (поз. D , рис. 2а). После этого выполнялся поворот манипулятора на угол 90° (позиция E) с последующим его опусканием до середины высоты стоек коников и освобождением рейферного захвата от лесоматериалов. Данные о затратах времени и энергоемкости (рис. 2с, d) приведены для участка цикла погрузки A_iD .

Затраты времени и энергии на освобождение захвата и укладку лесоматериалов индивидуальны для каждого оператора, в связи с чем не анализировались и не учитывались. Холостное возвращение манипулятора в исходную точку A_i осуществлялось обратной последовательностью действий. Затраты энергии и времени на обратное холостое движение зависят от варианта технологического процесса.

Изложенный анализ и данные рис. 2 справедливы для случая идеального управления каждым отдельным потребителем (гидроцилиндры стрелы, рукоятки и телескопического звена), при котором совокупная реализуемая ими мощность определяется по параметрам давления и расхода на каждом из них отдельно. При этом поток гидравлической жидкости для опускания рукоятки также полностью реализуется гидравлическим насосом.

Минимальные затраты энергии на этап A_iD для порожнего манипулятора составляют 64,8 кДж, а при перемещении пачки массой 700 кг по пути $A_{III}D$ – 95,5 кДж. Затраты времени на подъем круглых лесоматериалов по пути A_iD составляют от 3,8 с до 8,9 с, а их рост с увеличением массы погружаемой пачки имеет выраженный нелинейный характер и зависит от выбранного технологического процесса (рис. 2d).

Поворот манипулятора из позиции D (рис. 2а) в положение E , соответствующее продольной оси грузового отсека, и его последующее опускание в позицию F сопровождаются существенно меньшими затратами энергии и времени, которые мало зависят от массы погружаемых лесоматериалов. Затраты энергии на осуществление данного приема составляют порядка 7,8 кДж. Столь малая величина обусловлена опусканием манипулятора под собственным весом металлоконструкции, грейферного захвата и лесоматериалов. Гидравлический насос при этом не задействуется. Основная часть энергии тратится лишь на поворот манипулятора, а приемлемая скорость опускания стрелы полностью поддерживается за счет дросселирования вытесняемой из ее гидроцилиндра гидравлической жидкости. Совокупное время выполнения приема на пути DF составляет 4,5–5,5 с. При этом большая скорость опускания грейферного захвата практически не приводит к росту затрат энергии, однако усложняет его точное позиционирование в грузовом отсеке и приводит к дополнительным нагрузкам в момент контакта с погруженной пачкой.

Последующий обратный подъем порожнего манипулятора по пути FE (рис. 2а) требует около 27 кДж энергии за время движения 1,8 с. Перенос грейферного захвата по пути DA_1 совершается в среднем за 3,4 с при расходе энергии около 7,5 кДж, а в позицию A_{II} – за 5,2 с при расходе энергии 47 кДж. Близкая к указанной энергия (52 кДж) расходуется при переносе грейферного захвата в точку A_{III} с учетом выдвигания телескопического звена. На его перемещение дополнительно требуется от 1,9 с, а затраты энергии на привод пренебрежимо малы.

Следует обратить внимание на соотношение затрат энергии на перемещение порожнего манипулятора и манипулятора с грузом. При движении по пути $A_{II}D$ они составляют 78,9 кДж для порожнего и 127 кДж для пачки 1100 кг, а наибольшие энергозатраты приходится на гидроцилиндр подъема стрелы – 65,6 кДж и 108,9 кДж соответственно. Для варианта перемещения $A_{III}D$ общие энергозатраты составляют 100,4 кДж (за 5,49 с) для порожнего манипулятора и 142,4 кДж (за 6,37 с) при погрузке пачки массой 700 кг. Заметно, что в последнем случае для порожнего манипулятора реализуется большая средняя мощность 18,28 кВт против 22,4 кВт при грузовой работе. При отсутствии систем управления гидравлическим приводом и постоянной, максимальной подаче гидравлического насоса задействованные гидравлические потребители манипулятора стремятся реализовать всю доступную мощность в пределах максимального рабочего давления (до 26 МПа) и гидравлического расхода (до 155,4 $\text{дм}^3/\text{мин}$ при частоте вращения вала гидронасоса

2100 об/мин). Так, при погрузке пачки массой 700 кг статическое давление в гидроцилиндре стрелы (23,6 МПа) близко к максимальному. Малый запас по давлению (1,4 МПа) не позволяет проводить интенсивное начальное ускорение, вследствие чего в гидроцилиндре стрелы регистрируется малый гидравлический поток и, соответственно, низкая реализуемая мощность. Для порожнего манипулятора запас по давлению значительно больше (около 10,6 МПа), что обеспечивает возможность более интенсивного ускорения и, как следствие, потребления больших гидравлического потока и мощности.

Оценка эффективности работы манипулятора в разных условиях показана на рис. 2б. Заметно, что технологические варианты II и III позволяют реализовывать большую грузоподъемность манипулятора. Производительность погрузки пакетов лесоматериалов массой 800 кг для технологических вариантов I и II отличается в 1,31 раза. При этом оценка ЧЭПП_{пог} показывает прирост эффективности для варианта I более чем в 1,42 раза. Это обусловлено тем, что в варианте I не только меньше время выполнения операции, но и ниже энергозатраты на совершение требуемой полезной работы. Показатель производительности не может отразить этого изменения, а интегральная величина ЧЭПП_{пог} позволяет это сделать.

Различные варианты гидравлического привода обеспечивают разную эффективность погрузочных операций. Сравнительная оценка их эффективности на этапе $A_{III}D$ (рис. 2а) приведена на рис. 3.

В реальных конструкциях гидросистем, управляемых по нагрузке (LS), подача гидравлической жидкости в полость гидроцилиндра, в которой возникает разряжение, происходит одновременно двумя путями – самовсасыванием из сливной магистрали и из магистрали нагнетания насосом. В зависимости от пропускной способности данных линий реальная эффективность привода в процессе погрузки на этапе $A_{III}D$ будет находиться в области между кривыми 2 и 3 (рис. 3). Исследования показывают, что с увеличением числа одновременно задействованных потребителей и ростом разницы в их рабочем давлении эффективность управления гидроприводом по нагрузке (LS) снижается. Она тем ниже, чем больше совокупный потребляемый гидравлический поток и разность давлений на потребителях. Опытные операторы форвардеров одновременно задействуют до 5 гидравлических потребителей. Учитывая, что на погрузочных операциях гидроцилиндр стрелы задействуется более 85% времени, а давление в нем близко к максимальному, общие энергозатраты при таком совмещении и управлении по нагрузке стремятся к затратам нерегулируемого привода. Это ставит вопрос о целесообразности применения систем управления по нагрузке (LS) в гидросистемах форвардеров и поиске альтернативных вариантов.

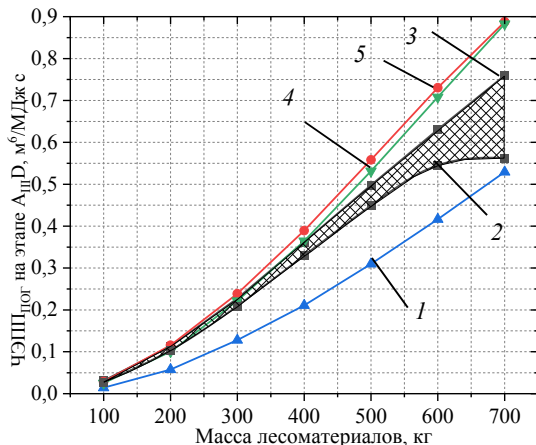


Рис. 3. Эффективность операции погрузки лесоматериалов на этапе $A_{III}D$ при разных вариантах организации гидропривода манипулятора: 1 – гидросистема с общим гидравлическим насосом и поддержанием постоянного рабочего давления (расход гидравлической жидкости равен сумме расходов на потребителях); 2 – гидросистема с общим гидронасосом, управлением расходом по нагрузке (LS) и принудительной подачей жидкости в гидроцилиндр рукояти гидронасосом; 3 – гидросистема с общим гидронасосом, управлением по нагрузке (LS) и наполнением гидроцилиндра рукояти путем самовсасывания жидкости; 4 – гидросистема с отдельным приводом каждого потребителя; 5 – гидросистема с отдельным приводом каждого потребителя и подачей в гидроцилиндр рукояти путем самовсасывания

Fig. 3. Efficiency of the forest materials loading operation at stage $A_{III}D$ for different variants of the manipulator's hydraulic drive organization: 1 – hydraulic system with a common hydraulic pump and constant working pressure maintenance (hydraulic fluid flow equals the sum of flows to the consumers); 2 – hydraulic system with a common hydraulic pump, load-sensing flow control, and forced fluid delivery to the boom cylinder by a pump; 3 – hydraulic system with a common hydraulic pump, load-sensing control, and boom cylinder filling via fluid self-priming; 4 – hydraulic system with a separate drive for each consumer; 5 – hydraulic system with a separate drive for each consumer and boom cylinder supply via self-priming

Исследования показали, что возможно несколько направлений для снижения энергопотребления гидравлических систем манипуляторов. Первый – выбор параметров гидроцилиндров не только по условию обеспечения ими требуемых силовых показателей и хода и согласование рабочих давлений всех гидроцилиндров, которые часто задействуются одновременно, в наиболее вероятных положениях рабочей зоны манипулятора. Второй – отказ от управляемых по нагрузке одноконтурных гидросистем в пользу гидросистем с отдельными источниками гидравлической энергии для группы потребителей или каждого отдельного потребителя. Последний вариант способен повысить эффективность погрузочных операций на этапе $A_{шD}$, как показано на рис. 3 (поз. 4 и 5).

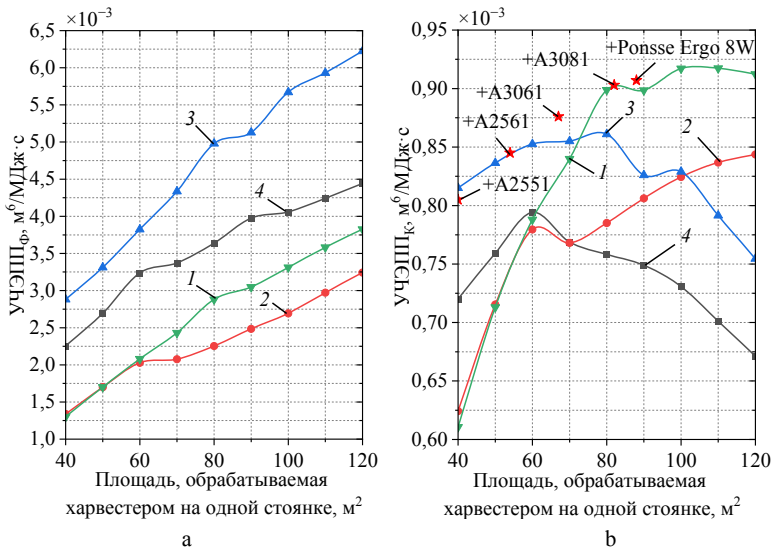


Рис. 4. Пример оценки эффективности форвардеров (а) Амкодор FF 1681 (1, 3) и Амкодор 2661-01 (2, 4) и комплекса машин «харвестер + форвардер» (б) при различной площади лесосеки, обрабатываемой харвестером с одной стойки: 1, 2 – при двухстороннем размещении лесоматериалов; 3, 4 – при одностороннем размещении круглых лесоматериалов относительно технологического коридора

Fig. 4. Example of efficiency assessment for forwarders (a) Amkodor FF 1681 (1, 3) and Amkodor 2661-01 (2, 4), and the «harvester + forwarder» machine complex (b) for varying areas of the felling site processed by the harvester from a single position: 1, 2 – with bilateral placement of forest materials; 3, 4 – with unilateral placement of round wood relative to the technological corridor

Для оценки эффективности по описанной методике форвардеров в целом в качестве базовых условий приняты почвогрунты II категории, среднее расстояние вывозки – 350 м, средний объем ствола – 0,8 м³, максимальный – 1,43 м³. Сортировка круглых лесоматериалов выполнена на 3 группы в пропорции по объему групп: крупные – 0,65, средние – 0,27, мелкие – 0,08.

Оценка эффективности (рис. 4а) дана для форвардеров с конструктивными параметрами, соответствующими моделям Амкодор FF 1681 (колесная формула 8К8) и Амкодор 2661-01 (колесная формула 6К6).

Заметно, что при малых (до 60 м²) участках, обрабатываемых с одной стоянки, и равномерном распределении лесоматериалов с двух сторон от технологического коридора более тяжелый форвардер Амкодор FF 1681 не имеет преимуществ в эффективности работы перед Амкодор 2661-01. Это обусловлено низкой концентрацией лесоматериалов и невозможностью реализации форвардером всего своего энергетического потенциала. Эффект от большей грузоподъемности этого форвардера и снижения количества транспортных операций нивелируется повышенной массой грейферного захвата и манипулятора при совершении погрузочных операций.

При больших площадях участков (для данных условий – свыше 60 м²) эффективность форвардера Амкодор FF 1681 при односторонней укладке выше, чем для Амкодор 2661-01, от 64,2% до 87,5%. Каждый из них эффективнее при односторонней укладке лесоматериалов, чем при двухсторонней: Амкодор FF 1681 – до 42%, а Амкодор 2661-01 – до 17%.

Рост эффективности отдельной машины не всегда приводит к росту эффективности комплекса МЛМ (рис. 4б). Как отмечалось выше, важным фактором эффективной работы форвардера является концентрация круглых лесоматериалов. Ее повышение достигается увеличением рабочего вылета манипулятора харвестера, размещением лесоматериалов только с одной стороны технологического коридора либо перетаскиванием поваленных деревьев между технологическими стоянками ходом харвестера. При оценке эффективности работы комплекса МЛМ (рис. 4б) учтено, что для увеличения площади участка лесосеки, разрабатываемой с одной стоянки, требуется проектное увеличение рабочего вылета манипулятора харвестера. Поэтому массовые, геометрические и силовые параметры манипуляторов харвестеров и их шасси приняты так, чтобы обеспечить возможность разработки участков лесосек заданной площади без передвижения харвестера своим ходом. К примеру, при объеме стволов в древостое до 1,43 м³ и харвестерной головке массой 860 кг для обработки с одной стоянки площади 120 м² принят харвестер собственной массой 24310 кг с вылетом манипулятора 9,5 м и

грузовым моментом брутто 278 кН·м, а для 40 м² – 13600 кг, 5,8 м и 170 кН·м соответственно.

Установлено, что в заданных условиях комплекс машин Амкодор FH 3081+Амкодор FF 1681 обладает на 27% большей эксплуатационной эффективностью в сравнении с комплексом Амкодор 2551+Амкодор 2661-01 и на 19% в сравнении с комплексом Амкодор 2561+ Амкодор 2661-01. При этом комплекс Амкодор FH 3081+Амкодор FF 1681 рекомендуется эксплуатировать по технологии с двухсторонней укладкой круглых лесоматериалов, а Амкодор 2551 (Амкодор 2561)+Амкодор 2661-01 – с односторонней. Допускается формирование комплекса машин в составе Амкодор 2561+Амкодор FF 1681, эффективность которого ниже, чем Амкодор FH 3081+ Амкодор FF 1681, на 8%.

Следует отметить, что несмотря на высокую эффективность комплекса Амкодор FH 3081+Амкодор FF 1681 в приведенных условиях, его эксплуатация на почвогрунтах с низкой несущей способностью (III и IV тип) существенно ограничена и уступает комплексам машин Амкодор 2551 (Амкодор 2561)+Амкодор 2661-01. Целевыми условиями его эксплуатации следует считать лесосеки со максимальным объемом ствола до 1,7 м³ при среднем значении 0,9–1,1 м³, расположенные на почвогрунтах с высокой несущей способностью (I–II категория).

Заключение. Исследованиями установлено, что применение величины удельного энергетического потенциала производительности в качестве критерия эффективности работы комплексов МЛМ позволяет выбирать рациональные параметры конструкций машин и технологических процессов для эффективной совместной эксплуатации с учетом изменения их производительности, эксплуатационной экономичности и надежности.

По разработанной методике с применением критерия частного энергетического потенциала производительности оценены приемы и режимы погрузки лесоматериалов. Установлено, что синхронное перемещение звеньев стрелы и рукояти манипулятора форвардера после предварительного сокращения его телескопического звена на 22,6% эффективнее в сравнении с совместным, но не синхронным перемещением.

Гидравлическая система манипулятора форвардера с отдельным приводом каждого потребителя в 1,15–1,41 раза эффективнее на погрузочных операциях в сравнении с системой с общим источником гидравлической энергии и управлением им по давлению нагрузки.

В рассмотренных условиях рубок главного пользования комплексам многооперационных лесозаготовительных машин следует применять технологию, при которой харвестерам с рабочим вылетом манипулятора 5,8–7,3 м

следует укладывать лесоматериалы с одной стороны, а при вылете 7,6–9,5 м – с двух сторон от технологического коридора. В зависимости от параметров используемого форвардера это повышает эксплуатационную эффективность комплекса машин на 13–32%.

Исследования позволили установить рациональные параметры комплексов МЛМ для реализации технологических процессов в высокополнотных древостоях с нормальным распределением стволов объемом до 1,4 м³ на грунтах с высокой несущей способностью в составе:

- харвестера мощностью 142–175 кВт (без учета дополнительных потребителей энергии), собственной массой 18,2–19,4 т, шириной 2,9–3 м, рабочим вылетом манипулятора не более 7,7 м и грузовым моментом брутто 230–242 кН·м, оборудованного харвестерной головкой массой 850–1050 кг с тяговым усилием 23–25 кН и имеющего обособленные гидравлические приводы харвестерной головки, манипулятора и движителя;

- форвардера мощностью 165–185 кВт (без учета дополнительных потребителей энергии), грузоподъемностью 23–25 м³ при собственной массе 22–23 т, оборудованного грейферным захватом с площадью сечения 0,35 м² и манипулятором грузоподъемностью 1150–1270 кг при рабочем вылете 8,5 м.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Букалов Д.А. Совершенствование производства сортиментов путем обоснования выбора энергосберегающей системы машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 19 с.

Герасимов Ю.Ю., Сенькин В.А., Вятайнен К. Производительность харвестеров на сплошных рубках // *Resources and Technology*. 2012. №2. С. 82–93. DOI: 10.15393/j2.art.2012.1642.

Голякевич С.А. Повышение надежности несущих конструкций многооперационных лесозаготовительных машин выбором режимов работы на основе энергетического потенциала: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2013. 184 с.

Голякевич С.А., Гороновский А.Р. Аналитическое моделирование технологических процессов заготовки древесины комплексами машин «харвестер – форвардер» // *Лесная инженерия, материаловедение и дизайн* : мат. 88-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотруд. и аспирантов. Минск, 2024а. С. 9–13.

Голякевич С.А., Гороновский А.Р. Математическая модель динамики манипуляторов многооперационных лесозаготовительных машин // *Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2024б. №1 (276). С. 132–143.

Емтыль З.К., Бартнев И.М., Драпалюк М.В. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: монография. М.: Наука, 2011. 408 с.

Макуев В.А. Критерии формирования парка лесосечных машин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2010. №1. С. 82–84.

Матвейко А.П., Клоков Д.В., Протас П.А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Практикум: учеб.-метод. пособие. Минск: БГТУ, 2013. 199 с.

Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калита Г.А. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера // Лесной вестник. 2022. Т. 26, №5. С. 93-101. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-93-101.

Рукомойников К.П., Купцова В.О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. №3. С. 117–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127.

Суханов Ю.В., Соколов А.П., Герасимов Ю.Ю. Оценка экономической эффективности систем машин для производства топливной щепы в Республике Карелия // Resources and Technology. 2013. №10 (1). С. 1–23. DOI: 10.15393/j2.art.2013.1941.

Сюнёв В., Соколов А., Коновалов А., Катаров В.К., Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Карвинен С., Вяльккю Э. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия. Йёнссу: НИИ леса Финляндии, 2008. 126 с.

Якимович С.Б., Ефимов Ю.В. Оценка эффективности систем машин и харвестерных агрегатов для заготовки древесины по фундаментальному критерию технолога – удельной энергоёмкости // Лесной вестник. 2020. Т. 24, №1. С. 59–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-1-59-68.

Ackerman S.A., Talbot B., Astrup R. The effect of tree and harvester size on productivity and harvester investment decisions // International Journal of Forest Engineering. 2022. Vol. 33, iss. 1. P. 22–32. DOI: 10.1080/14942119.2021.1981046.

Irousek R., Klvac R., Skoupy A. Productivity and costs of the mechanised cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations // Journal of Forest Science. 2007. Vol. 53, no. 10. P. 476-482. DOI: 10.17221/2088-JFS.

Soman H., Kizha A.R., Delgado B.M., Kenefic L.S., Kanoti K. Production economics: comparing hybrid tree-length with whole-tree harvesting methods // Forestry. 2020. Vol. 93, iss. 3. P. 389–400. DOI: 10.1093/forestry/cpz065.

References

Ackerman S.A., Talbot B., Astrup R. The effect of tree and harvester size on productivity and harvester investment decisions. *International Journal of Forest Engineering*, 2022, vol. 33, iss. 1, pp. 22–32. DOI: 10.1080/14942119.2021.1981046.

Bukalov D.A. Improvement of assortments production by substantiating the choice of energy-saving machinery system: author’s abstract. Diss. ... Cand. Tech. Sci. St. Petersburg, 2009. 19 p. (In Russ.)

Gerasimov Yu.Yu., Senkin V.A., Vyataynen K. Productivity of harvesters at clear cuttings. *Resources and Technology*, 2012, no. 2, pp. 82–93. DOI: 10.15393/j2.art.2012.1642. (In Russ.)

Golyakevich S.A. Improving the reliability of load-bearing structures of multi-operational forestry machines by selecting operating modes based on energy potential. Diss. ... Cand. Tech. Sci. Minsk, 2013. 184 p. (In Russ.)

Golyakevich S.A., Goronovskiy A.R. Analytical modeling of wood harvesting technological processes by “harvester-forwarder” machine complexes. *Forest Engineering, Materials Science and Design: mat. of the 88th sci.-tech. conf. of Teaching Staff, Researchers and PhD students. Minsk, 2024a*, pp. 9–13. (In Russ.)

Golyakevich S.A., Goronovskiy A.R. Mathematical model of multi-operational forestry machine manipulators dynamics. *Proceedings of BSTU. Ser. 1: Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 132–143. (In Russ.)

Irousek R., Klvac R., Skoupy A. Productivity and costs of the mechanised cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *Journal of Forest Science*, 2007, vol. 53, no. 10, pp. 476–482. DOI: 10.17221/2088-JFS.

Makhev V.A. Criteria for the formation of a fleet of logging machines. *Lesnoy Vestnik*, 2010, no. 1, pp. 82–84. (In Russ.)

Matveyko A.P., Klovov D.V., Protas P.A. Technology and Equipment for Logging and Timber Yard Operations. Practical Guide: educ.-method. manual. Minsk: BSTU, 2013. 199 p. (In Russ.)

Mokhiev A.P., Kunitskaya O.A., Kalita G.A. Assessment of the reliability of a forest harvester. *Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 93–101. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-93-101. (In Russ.)

Rukomoynikov K.P., Kuptsova V.O. Substantiation of fuel consumption standards for multi-operational forestry machines using the example of a harvester. *Russian Forestry Journal*, 2020, no. 3, pp. 117–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127. (In Russ.)

Soman H., Kizha A.R., Delgado B.M., Kenefic L.S., Kanoti K. Production economics: comparing hybrid tree-length with whole-tree harvesting methods. *Forestry*, 2020, vol. 93, iss. 3, pp. 389–400. DOI: 10.1093/forestry/cpz065.

Sukhanov Yu.V., Sokolov A.P., Gerasimov Yu.Yu. Economic efficiency assessment of machinery systems for fuel chip production in the Republic of Karelia. *Resources and Technology*, 2013, no. 10 (1), pp. 1–23. DOI: 10.15393/j2.art.2013.1941. (In Russ.)

Syunev V., Sokolov A., Konovalov A., Katarov V.K., Seliverstov A.A., Gerasimov Yu.Yu., Karvinen S., Vyalckyyu E. Comparison of Logging Technologies in Forestry Companies of the Republic of Karelia. Joensuu: Finnish Forest Research Institute, 2008. 126 p. (In Russ.)

Yakimovich S.B., Efimov Yu.V. Efficiency evaluation of machinery systems and harvester units for wood harvesting based on the fundamental technologist's criterion –

specific energy intensity. *Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 59–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-1-59-68. (In Russ.)

Yemtyl Z.K., Bartenev I.M., Drapalyuk M.V. Hydraulic Manipulators and Forest Technological Equipment: monograph. Moscow: Nauka, 2011. 408 p. (In Russ.)

Материал зпоступил в редакцию 26.01.2026

Голякевич С.А. Методика и результаты оценки эксплуатационной эффективности комплексов многооперационных лесозаготовительных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 258. С. 329–348. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.258.329-348

В статье рассматриваются вопросы прогнозирования эксплуатационной эффективности комплексов многооперационных лесозаготовительных машин. Для этого предложена методика, основанная на использовании нового оценочного критерия – удельно энергетического потенциала производительности комплекса машин. Он определяется с использованием величин полезной работы, произведенной машиной при соответствующих энергетических и временных затратах. В статье приводится порядок оценки структуры совместного технологического цикла харвестеров и форвардеров и порядок определения величин входящих в названный критерий. С использованием предложенной методики выполнен анализ эффективности операции погрузки круглых лесоматериалов манипулятором форвардера в зависимости от технологий предварительной работы харвестера, установлены характерные режимы и варианты выполнения операции, которые эффективнее на 22,6%. Отмечено, что на эффективность погрузочных операций существенно влияет синхронность и траектория движений звеньев манипулятора, и исполнение их гидравлического привода. Доказано, что гидравлическая система манипулятора форвардера с отдельным приводом каждого потребителя в 1,15–1,41 раза эффективнее на погрузочных операциях в сравнении с системой с общим источником гидравлической энергии и управлением им по давлению нагрузки. Проведен анализ эффективности совместной работы наиболее распространенных в Республике Беларусь харвестеров и форвардеров для различного их сочетания в рамках одного комплекса машин. Установлены рациональные параметры технологических процессов их работы. Обоснованы технические характеристики перспективных харвестера и форвардера в составе комплекса многооперационных лесозаготовительных машин для рубок в высокополнотных древостоях с нормальным распределением стволов объемом до 1,4 м³ на грунтах с высокой несущей способностью.

Ключевые слова: харвестер, форвардер, технология, манипулятор, гидропривод, режим, операция, критерий.

Golyakevich S.A. Method and Results of Evaluating the Operational Efficiency of Multi-Operational Forest Harvesting Machine Systems. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehneskoj Akademii*, 2026, iss. 258, pp. 329–348 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.258.329-348

This article addresses the forecasting of the operational efficiency of multi-operational forest harvesting machine complexes. A methodology is proposed for this purpose, based on the use of a new evaluative criterion – the specific energy productivity potential of the machine complex. This potential is determined using the values of useful work performed by the machine with corresponding energy and time expenditures. The article outlines the procedure for assessing the structure of the joint technological cycle of harvesters and forwarders and the method for determining the values comprising the aforementioned criterion. Using the proposed methodology, an analysis of the efficiency of the roundwood loading operation by a forwarder's manipulator was conducted, depending on the harvester's preliminary work technologies. Characteristic operating modes and execution variants for this operation were identified, which are up to 22,6% more efficient. It is noted that the efficiency of loading operations is significantly influenced by the synchronism and trajectory of the manipulator's link movements and the performance of its hydraulic drive. It is proven that a forwarder manipulator's hydraulic system with a separate drive for each consumer is 1,15–1,41 times more efficient in loading operations compared to a system with a common source of hydraulic energy and load sensing control. An analysis of the joint work efficiency of the most common harvesters and forwarders in the Republic of Belarus was performed for their various combinations within a single machine complex. Rational parameters for their technological processes were established. Technical specifications for prospective harvester and forwarder units within a multi-operational forest harvesting machine complex were substantiated. The complex is intended for logging in high-density stands with a normal distribution of stems (with volumes up to 1,4 m³) on soils with high bearing capacity.

Key words: harvester, forwarder, technology, manipulator, hydraulic drive, mode, operation, criterion.

ГОЛЯКЕВИЧ Сергей Александрович – доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства Белорусского государственного технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 1489-4095. ORCID: 0000-0001-5095-8725.

220006, ул. Свердлова, д. 13а, г. Минск, Республика Беларусь. E-mail: gsa@belstu.by

GOLYAKEVICH Sergey A. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology, Belarusian State Technological University. SPIN-code: 1489-4095. ORCID: 0000-0001-5095-8725. 220006. Sverdlova str. 13a. Minsk. Republic of Belarus. E-mail: gsa@belstu.by