

УДК 630\*36.001.6

**С. А. Голякевич, А. Р. Гороновский, С. П. Мохов**  
Белорусский государственный технологический университет

### **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРВАРДЕРОВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Рассмотрены основные критерии оценки технических характеристик лесных машин на стадии их проектирования. Отмечены недостатки экономического анализа работы машин и анализа, проводимого по критерию технической производительности. Показана целесообразность использования в качестве обобщающего оценочного критерия комплексных технических величин. Установлено, что структурно данные критерии должны состоять из показателей времени, затрачиваемого машиной на выполнение каждой операции, величин полезно выполненной работы, и работы, затраченной на перемещение собственной массы машины и технологического оборудования.

На основе рассмотренной структуры предложен комплексный технический критерий оценки параметров многооперационных лесных машин (удельный энергетический потенциал производительности), учитывающий стохастичность условий их работы. На примере форвардеров «Амкодор» показана возможность использования предложенного критерия для оценки влияния их технических параметров на конечную эксплуатационную эффективность.

Показано, что использование такого критерия позволяет сопоставлять эксплуатационную эффективность многооперационных лесных машин, имеющих значительные особенности конструктивного исполнения: колесные формулы и диаметры колес, грузоподъемность и собственная масса, энергетические параметры силовых установок, привода технологического оборудования и движителя. Отмечена возможность введения в критерий удельного энергетического потенциала производительности граничных условий в виде допускаемых скоростей и ускорений. Указано что наряду с энергетическими параметрами приводов, их величина может ограничиваться динамическими показателями нагружения конструкций, требованиями к эргономике рабочего места оператора и его физиологическими возможностями. Отдельно показано, что определение энергетических и временных величин для критерия удельного энергетического потенциала производительности может быть произведено теоретически и экспериментально, что значительно расширяет конечную область его применения.

**Ключевые слова:** лесная машина, эксплуатационные свойства, потребительские качества, операции, критерии, энергетический потенциал производительности, форвардер.

**S. A. Golyakevich, A. R. Goronovsky, S. P. Mokhov**  
Belarusian State Technological University

### **METHOD ESTIMATION SPECIFICATIONS FORWARDERS ON THE DESIGN STAGE**

Consider the main criteria for assessing the technical characteristics of forest machines at the design stage. It noted major shortcomings of the economic analysis of machines and the analysis conducted by the criterion of technical performance. The expediency of use as synthesis of complex technical evaluation criterion values. It was found that structurally these criteria should consist of indicators of time spent by the machine to perform each operation, the useful work performed, and the work done to move its own weight machines and process equipment. On the basis of the considered structure proposed a comprehensive technical evaluation criterion multioperational settings forest machines (specific energy potential performance), taking into account the stochastic conditions of their work. For example Amkodor forwarders possibility of using the proposed criteria for assessing the impact of the technical parameters of the final operational efficiency. It is shown that the use of this criterion allows to compare operational efficiency multioperational forest machines, with significant model features: Axels and wheel diameter, load capacity and its own weight, the energy parameters of power plants, manufacturing equipment drive and propulsion. The possibility of the introduction of the criterion of specific energy potential performance of the boundary conditions in the form of permitted speeds and accelerations. It indicated that along with power parameters of drives, their value may be limited dynamic performance load designs, ergonomics requirements operator position and physiological capabilities. Separately, it is shown that the definition of energy and time values for the criterion of specific energy potential performance can be produced theoretically and experimentally, which significantly expands the scope of its final application.

**Key words:** forest machine, operational properties, consumer quality, operation, criteria, energy potential productivity forwarder.

### Актуальность рассматриваемой проблемы.

Развитие в Республике Беларусь собственного лесного машиностроения привело к созданию семейств специализированных лесозаготовительных машин, реализующих различные технологии заготовки древесины. На современном этапе наибольшее распространение получила сортиментная технология, для реализации которой на ОАО «Амкодор» разработано 3 харвестера («Амкодор 2531», «Амкодор 2541», «Амкодор 2551») и 5 форвардеров («Амкодор 2631», «Амкодор 2641», «Амкодор 2661-01», «Амкодор 2662-01», «Амкодор 2682-01»). Все они отличаются между собой техническими характеристиками [1] и позиционируются заводом-изготовителем как машины, переназначенные для трелевки сортиментов в различных почвенно-грунтовых условиях.

Обосновывая на стадии проектирования технические характеристики будущей лесной машины, специалисты-конструкторы стремятся «перекрыть» ими определенный диапазон потенциальных эксплуатационных условий и обеспечить лучшую эффективность своих машин в сравнении с конкурентами. При таком подходе наибольшее затруднение вызывает не столько сам анализ многочисленных технических характеристик машин, сколько выбор некоторого обобщающего критерия для проведения сравнительной оценки их влияния на эффективность машин.

Использование в этом качестве экономической оценки себестоимости заготавливаемой древесины невозможно по ряду причин. Во-первых, значительное качественное и количественное влияние на конечный результат экономических расчетов оказывает соотношение между стоимостью заготовленных сортиментов, топливо-смазочных материалов, запасных частей и др. на момент расчета. Из года в год данные величины меняются, и сопоставимость этих данных низкая. Во-вторых, ряд факторов, учитываемых при экономической оценке, не имеет прямого отношения к конструкции машин и ее взаимодействию с условиями эксплуатации, к примеру: стоимость леса на корню, заработная плата оператора, затраты на доставку топливо-смазочных материалов и т. д. В третьих, работа машин в более сложных эксплуатационных условиях (к примеру на грунтах с низкой несущей способностью или в тонкомерном древостое) потенциально влечет за собой рост экономических затрат. Причина такого роста часто не однозначна и заключается не только в изменении производственных условий, но и в соответствии им характеристик машины. Установление конкретного соотношения между влиянием данных групп факторов в ряде случаев затруднительно.

В качестве обобщающего оценочного критерия целесообразнее использовать комплексные технические величины. При этом следует учитывать влияние как минимум 3 показателей: потенциальное время выполнения машиной цикла работ  $T_{ц}$  (с), произведенный за указанное время объем полезной работы  $A_{\text{полезн}}$  и работы «вредной», т. е. затраченной на собственное перемещение машины или ее оборудования без предмета труда  $A_{\text{вр}}$  (Дж). В этой связи величина технической производительности машины также не может быть адекватно использована для рассматриваемого сравнительного анализа.

С физической точки зрения техническая производительность – это отношение полезной работы, выполненной машиной (выражена она в объеме заготовленной древесины), ко времени ее выполнения. При этом работа машины на перемещение собственной массы или массы технологического оборудования, которая в данном случае является «вредной», не учитывается.

**Методика проведения исследований.** Рассмотрим последовательность такого анализа на примере форвардера. Под обобщающим критерием оценки эффективности его конструкции и параметров для заданных условий эксплуатации будем понимать соотношение между временем выполнения операций в цикле и КПД ( $\eta$ ) их выполнения, который рассчитывается как соотношение между полезной и полной выполненными работами. Подробный вывод данного критерия, именуемого удельным энергетическим потенциалом производительности форвардера  $УЭПП_{\text{ф}}$ , изложен в работах [2–4]:

$$\begin{aligned} УЭПП_{\text{ф}} &= \frac{A_{\text{полн}}}{A_{\text{полезн}}} T_{\text{ц}} = \\ &= \frac{A_{\text{полн}}^{\text{раб.х}} + A_{\text{полн}}^{\text{хол.х}} + A_{\text{полн}}^{\text{погр}} + A_{\text{полн}}^{\text{разгр}}}{A_{\text{полн}}^{\text{раб.х}} + A_{\text{полн}}^{\text{погр}} + A_{\text{полн}}^{\text{разгр}}} T_{\text{ц}} = \frac{T_{\text{ц}}}{\eta}, \quad (1) \end{aligned}$$

где  $A_{\text{полн}}$  – полная работа, выполненная форвардером на всех операциях технологического цикла;  $A_{\text{полн}}^i$  – полезная работа, выполненная форвардером на  $i$ -й технологической операции.

Как видно из выражения (1), данный критерий оценки эффективности параметров форвардера является комплексным и соответствует ранее рассмотренным требованиям. В расчете  $УЭПП$  в явном виде учитывается энергия, расходуемая машиной как на рабочих, так и на холостых операциях (движение, погрузка и разгрузка сортиментов), в том числе вычисляются энергозатраты и время выполнения этапов разгона и торможения форвардера и технологического оборудования. При этом величины работ, выполненных форвардером, определяются как интегралы реализуемой машиной мощности

на каждом этапе (разгон, равномерное движение, торможение) выполняемых операций. Граничными условиями для данного критерия являются предельные технические характеристики исследуемых машин, показатели условий их эксплуатации, а также надежности, безопасности, эргономики и других потребительских качеств [3] при достижении заданных режимов работы.

Рассмотрим процесс движения форвардера с пачкой сортиментов в условиях грунтов с низкой несущей способностью. Достижение рабочей скорости движения форвардера ограничено величиной мощности установленного двигателя, выбранным передаточным числом и КПД трансмиссии (тяговые и динамические свойства), буксованием движителя (цепные свойства), внешними силами сопротивления движению и др. Сама возможность движения машины в заданных условиях ограничена давлением движителя на грунт и максимальным количеством проходов по заданному участку. Кроме того, максимальная скорость движения форвардера ограничивается величиной динамической нагруженности его конструкции, оператора, безопасностью движения и др.

Режим движения форвардера и мощность привода движителя  $N_{\text{движ}}(t)$  (Вт), требуемая для его реализации в каждый момент времени  $t$  (с) от начала движения, описываются уравнением (2), с учетом ограничений в виде неравенств:

$$\left. \begin{aligned} &((M_1 + m_1 + m_r) \ddot{y}_1 + P_f + P_i) \dot{y}_1 = N_{\text{движ}}(t), \\ &N_{\text{движ}}(t) \leq N_{\text{движ}}^{\max} \eta_{\text{движ}}, \\ &\ddot{y}_1 \leq a_{\text{движ}}^{\max}, \quad \dot{y}_1 \leq v_{\text{движ}}^{\max}, \quad y_1 \leq L_{\text{движ}}, \end{aligned} \right\} (2)$$

где  $M_1$  – масса базового шасси лесозаготовительной машины с грузом или без груза, кг;  $m_1$ ,  $m_r$  – массы манипулятора целиком и грейферного захвата соответственно, кг;  $P_f$  – сила сопротивления качению форвардера, Н;  $P_i$  – сила сопротивления движению под уклон, Н;  $\ddot{y}_1$  – ускорение движения форвардера в момент времени  $t$ , м/с<sup>2</sup>;  $\dot{y}_1$  – скорость движения форвардера в момент времени  $t$ , м/с;  $y_1$  – перемещение форвардера в момент времени  $t$  относительно начального положения, м;  $N_{\text{движ}}^{\max}$  – максимальная мощность привода движителя, Вт;  $\eta_{\text{движ}}$  – КПД привода движителя;  $a_{\text{движ}}^{\max}$  – максимально возможное ускорение форвардера в заданных условиях движения, м/с<sup>2</sup>;  $v_{\text{движ}}^{\max}$  – максимальная допустимая скорость движения по условию динамической нагруженности несущей конструкции форвардера, м/с;  $L_{\text{движ}}$  – расстояние перемещения форвардера, м.

Система уравнений и неравенств (2) используется для определения ускорения, скорости и время движения форвардера между технологическими стоянками. При этом величина силы сопротивления качению  $P_f$  (Н) лесозаготовительной машины в каждый момент времени значительно зависит от действующих на элементы движителя опорных реакций  $R_{\text{ш}_i}$  (Н). В зависимости от требуемой точности проводимых расчетов величины  $R_{\text{ш}_i}$  (Н) могут определяться как в статическом положении машины, так и с учетом динамики [4–7]. Значения сил сопротивления качению  $P_f$  (Н) и максимального ускорения движения  $a_{\text{движ}}^{\max}$  (м/с<sup>2</sup>) определяются на основании известных методик [5] по условию реализации требуемой касательной силы тяги.

Далее по найденным из выражения (2) данным определяется продолжительность рабочего и холостого хода форвардера, а также величины его полной работы (3):

$$A_{\text{полн}}^{\text{движ}} = \int_0^{t_{\text{раб.х}}} N(t)_{\text{раб.х}} dt + \int_0^{t_{\text{ход.х}}} N(t)_{\text{хол.х}} dt. \quad (3)$$

Полезная мощность, а следовательно, и работа определяется из выражения (4), в величины  $P_f$  (Н) и  $P_i$  (Н) которого входит лишь масса перевозимых сортиментов:

$$A_{\text{движ}}^{\text{полезн}} = (P_f + P_i) y_1. \quad (4)$$

Величины работ на операциях погрузки и разгрузки сортиментов находятся с использованием систем уравнений и неравенств (5) и (6) [3]:

$$\left. \begin{aligned} &(M_{\text{под}} + (I_2 + (m_r + m_{\text{сорт}}) l_r^2) \ddot{y}_2) \dot{y}_2 = \\ &= N_{\text{под. ман}}(t), \\ &N_{\text{под. ман}}(t) \leq N_{\text{под. ман}}^{\max} \eta_{\text{под. ман}}, \\ &\ddot{y}_2 \leq \varepsilon_{\text{под}}^{\max}, \quad \dot{y}_2 \leq \omega_{\text{под}}^{\max}, \quad y_2 \leq \alpha_{\text{под}}, \end{aligned} \right\} (5)$$

где  $M_{\text{под}}$  – статический грузовой момент манипулятора при заданном вылете, Н·м;  $m_r$  – масса грейферного захвата, кг;  $\varepsilon_{\text{под}}^{\max}$ ,  $\omega_{\text{под}}^{\max}$  – максимальное угловое ускорение (рад/с<sup>2</sup>) и угловая скорость подъема манипулятора (рад/с) соответственно;  $m_{\text{сорт}}$  – масса сортимента, кг;  $\eta_{\text{под. ман}}$  – КПД манипулятора при подъеме сортимента;  $y_2$  – обобщенная координата угла подъема стрелы манипулятора, рад;  $N_{\text{под. ман}}^{\max}$  – максимальная мощность привода стрелы манипулятора, Вт;  $\alpha_{\text{под}}$  – угол подъема стрелы манипулятора, град;  $l_r$  – вылет манипулятора, м;  $I_2$  – момент инерции подъема манипулятора, кг·м<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned} & \left( (I_3 + (m_r + m_{\text{сорт}})l_r^2) \ddot{y}_3 \right) \dot{y}_3 = N_{\text{пов.ман}}(t); \\ & N_{\text{пов.ман}}(t) \leq N_{\text{пов.ман}}^{\max} \eta_{\text{пов.ман}}; \\ & \ddot{y}_3 \leq \varepsilon_{\text{пов}}^{\max}, \dot{y}_3 \leq \omega_{\text{пов}}^{\max}, y_3 \leq \alpha_{\text{пов}}. \end{aligned} \quad (6)$$

где  $I_3$  – момент инерции поворота манипулятора, кг·м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_{\text{пов}}^{\max}$ ,  $\omega_{\text{пов}}^{\max}$  – максимальное угловое ускорение (рад/с<sup>2</sup>) и угловая скорость поворота манипулятора (рад/с) соответственно;  $m_{\text{сорт}}$  – масса сортимента, кг;  $\eta_{\text{пов.ман}}$  – КПД манипулятора при повороте;  $y_3$  – обобщенная координата угла поворота стрелы манипулятора, рад;  $N_{\text{пов.ман}}^{\max}$  – максимальная мощность привода поворота манипулятора, Вт;  $\alpha_{\text{пов}}$  – угол поворота стрелы манипулятора, град.

При определении полезных составляющих работ на погрузочно-разгрузочных операциях, из выражений исключается масса  $m_r$  и моменты инерции  $I_2$  и  $I_3$ , а также грузовой момент манипулятора  $M_{\text{под}}$  при определении требуемого подъемного момента.

Количество циклов выполнения операций погрузки и разгрузки сортиментов в пределах одного технологического цикла работы машины определяется отношением объема ее грузовой платформы к объему сортиментов, погружаемых за один цикл.

**Заключение.** Предложенная в настоящей работе методика позволяет на стадии проектирования оценить влияние основных конструктивных параметров форвардеров на величины времени их цикла, полезной и полной выполненных работ и на их основе рассчитать комплексный обобщающий оценочный критерий – удельный энергетический потенциал производительности.

Преимуществами рассмотренной расчетной методики являются: учет энергетических и временных показателей работы форвардеров на установившихся и переходных режимах работы, возможность повышения точности проводимых расчетов при совершенствовании расчетных схем и методов оценки взаимодействия форвардеров с предметом труда и поверхностью движения, учет параметров регулирования привода технологического оборудования и движителя и др. Также возможно ограничение рассматриваемых рабочих режимов нормативными показателями взаимодействия машин с лесными экосистемами, величинами динамического воздействия на конструкцию машины и оператора и др. Кроме того, показатели работы форвардера наряду с теоретическим расчетом могут быть получены экспериментально, что значительно расширяет сферу возможного применения данного критерия.

### Литература

1. Анализ тенденций развития конструкций многооперационных лесозаготовительных машин / С. П. Мохов и [др.] // Труды БГТУ. Лесная и деревообраб. пром-сть. 2012. № 2. С. 18–20.
2. Голякевич С. А. Анализ эксплуатационных режимов работы многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. промышленность. С. 72–78.
3. Голякевич С. А. Комплексная техническая оценка потребительских качеств лесных машин // Труды БГТУ. № 2: Лесная и деревообраб. промышленность. 2015. С. 67–71.
4. Голякевич С. А. Повышение надежности несущих конструкций многооперационных лесных машин выбором режимов работы на основе энергетического потенциала: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2013. 27 с.
5. Пищов С. Н. Применение движителя комбинированного типа для повышения тягово-сцепных свойств лесных погрузочно-транспортных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: Минск, 2008. 24 с.
6. Голякевич С. А. Математическая модель для оценки несущих конструкций многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. № 2: Лесная и деревообраб. промышленность. 2013. С. 65–72.
7. Арико С. Е. Обоснование параметров валочно-сучкорезно-раскряжевой машины для рубок промежуточного лесопользования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2012. 25 с.

### References

1. Mokhov, S. P. Construction analysis of trends multioperational logging machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 18–20 (In Russian).
2. Goljakevich S. A. Analysis of the operational modes of multioperational logging machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 72–78 (In Russian).
3. Goljakevich S. A. A comprehensive technical assessment of consumer qualities of forest machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 67–71 (In Russian).
4. Goljakevich S. A. *Povyshenie nadezhnosti nesushihh konstrukcij mnogooperacionnyh lesnyh mashin vyborom rezhimov raboty na osnove jenergeticheskogo potenciala*: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk

[Improving the reliability of load-bearing structures of forest machines multioperational choice of operating modes based on the energy potential. Abstract of thesis cand. of techn. sci.]. Minsk, 2013. 27 p.

5. Pishhov S. N. *Primenenie dvizhitelja kombinirovannogo tipa dlja povyshenija tjadovo-scepnih svojstv lesnyh pogruzochno-transportnyh mashin*: Avtoref. dis. kand. tehn. nauk [Application of the combined type of engine to improve traction characteristics forest-governmental loading and transport machines. Abstract of thesis cand. of techn. sci.]. Minsk, 2008. 24 p.

6. Goljakevich S. A. A mathematical model for evaluating bearing structures multioperational logging machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 65–72 (In Russian).

7. Ariko S. E. *Obosnovanie parametrov valochno-suchkorezno-raskrzazhevochnoj mashiny dlja rubok promezhutochnogo lesopol'zovanija*: Avtoref. dis. kand. tehn. nauk [Rationale settings feller-suchkorezno-raskryazhevochnoy machines for intermediate forest cuttings. Abstract of thesis cand. of techn. sci.]. Minsk, 2012. 25 s.

### Информация об авторах

**Голякевич Сергей Александрович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gsa@belstu.by

**Гороновский Андрей Романович** – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок, проректор по воспитательной работе. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: arg@belstu.by

**Мохов Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесных машин и технологии лесозаготовок, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lmitlz@belstu.by

### Information about the authors

**Golyakevich Sergey Aleksandrovich** – PhD (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Logging Machinery and Technology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gsa@belstu.by

**Goronovsky Andrey Romanovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor of The Department of Logging Machinery and Technology, Vice-rector for education work. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: arg@belstu.by

**Mokhov Sergey Petrovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Logging Machinery and Technology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lmitlz@belstu.by

Поступила 15.02.2016