УДК 630*36:621.9

С. А. Голякевич[1], А. Р. Гороновский[1], В. А Коробкин[2]
[1]Белорусский государственный технологический университет
[2]Белорусский национальный технический университет

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСОВ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

В статье изложена методика прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин. В основе методики лежит гипотеза о том, что все эксплуатационные свойства лесозаготовительных машин и их оценочные показатели на практике влияют на ограниченное число эксплуатационных потребительских качеств: эксплуатационную надежность, производительность, экономичность, безопасность и экологичность. Установлено, что все они могут быть оценены величинами полезно выполненной работы, затраченной энергии и времени на осуществление операции. Данные величины объединены в единый оценочный критерий энергетического потенциала производительности. Отмечено, что данные для расчета критерия могут быть получены как экспериментальным путем, так и теоретически на основе математического моделирования технологий работы, конструкций машин, энергопотребления и ресурса. Изложен порядок использования методики при получении данных теоретическим путем. Она разбита на ряд блоков, отвечающих за моделирование условий эксплуатации, общее моделирование технологического процесса, моделирование технологических операций, анализ эксплуатационных свойств, оценку ресурса машин, анализ подготовленности операторов и в целом за прогнозирование эффективности на основе работы предыдущих блоков. Даны ссылки на предыдущие работы авторов, в которых приводятся математические модели, лежащие в основе работы отдельных блоков методики, раскрывается вывод оценочного критерия.

Ключевые слова: харвестер, форвардер, рубильная машина, методика, эффективность, комплекс машин, технология, ресурс, энергопотребление, безопасность, экологичность.

Для цитирования: Голякевич С. А., Гороновский А. Р., Коробкин В. А. Методика прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 125–131.
DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-17.

S. A. Golyakevich[1], A. R.Goronovsky[1], V. A. Korobkin[2]
[1]Belarusian State Technological University
[2]Belarusian National Technical University

METHODOLOGY FOR PREDICTING THE EFFICIENCY OF FORESTRY MACHINERY COMPLEXES

The article outlines a methodology for predicting the efficiency of logging machine complexes. The methodology is based on the hypothesis that all operational properties of forestry machines and their evaluation indicators in practice determine a limited number of operational consumer qualities: operational reliability, productivity, efficiency, safety and environmental friendliness. It has been established that all of them can be assessed by the values of useful work performed, energy expended and time spent on performing the operation. These values are combined into a single evaluation criterion of the energy potential of productivity. It is noted that the criteria for calculating can be obtained both experimentally and theoretically on the basis of mathematical modeling of operating technologies, machine designs, energy consumption and resource. The procedure for using the methodology when obtaining data theoretically is outlined. The methodology is divided into a number of blocks responsible for modeling operating conditions, general modeling of the technological process, modeling technological operations, analysis of operational properties, assessment of machine life, analysis of operator preparedness and, in general, for forecasting efficiency based on the work of previous blocks. References are given to the author's previous works, which provide mathematical models underlying the work of individual blocks of the methodology, reveal the conclusion of the evaluation criterion.

Keywords: harvester, forwarder, chipper, methodology, efficiency, complex of machines, technology, resource, energy consumption, safety, environmental friendliness.

For citation: Golyakevich S. A., Goronovsky A. R., Korobkin V. A. Methodology for predicting the efficiency of forestry machinery complexes. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 125–131 (In Russian).
DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-17.

Введение. Лесозаготовительное производство в нашей стране базируется на использовании многооперационных машин отечественного производства. На практике их объединяют в лесозаготовительные комплексы, состоящие из нескольких отдельных машин разного назначения, которые выполняют соответствующие операции определенного технологического процесса.

Конструкции таких машин стараются подбирать под природно-производственные условия, соответствующие конкретному предприятию. Такой выбор определяется требованиями по обеспечению каждой отдельной машиной заданного набора значимых эксплуатационных свойств [1]. Как правило, это оценки устойчивости, проходимости, маневренности машин, возможности взаимодействия с предметом труда, имеющим определенные характеристики и т. д. Важно заметить, что улучшение показателей одних свойств часто приводит к явному ухудшению других. Поэтому на практике, в конкретных условиях эксплуатации, показатели ряда свойств часто являются избыточными, другие, наоборот, – недостаточными. В качестве примера можно привести распространенные ситуации застревания машин в лесных почвогрунтах (недостаточная опорная проходимость) или постоянную работу на неполном вылете манипулятора (завышенный вылет или низкая устойчивость машины при работе с определенным предметом труда).

Практика объединения машин в лесозаготовительные комплексы, как правило, ограничивается базовыми принципами [2]: технологической совместимостью машин, кратностью их производительности, близостью конструкций базовых шасси и т. д.

На предприятиях лесного машиностроения при создании новых машин, как правило, руководствуются теми же принципами или создают машины, имеющие технические характеристики близкие к зарубежным аналогам. Последний подход вовсе не учитывает специфику условий эксплуатации машин в нашей стране.

Безусловно, учет эксплуатационных свойств и базовых принципов объединения машин в технологические комплексы весьма важен. Однако в условиях отсутствия интегрального оценочного критерия и точных математических моделей получения данных для него сложно достичь результата по прогнозированию эффективности машин. Соответственно, отечественные лесные машины либо остаются аналогами зарубежных (т. е. без адаптации к условиям работы в стране), либо позиционируются как универсальные машины для работы в широком диапазоне условий. При этом реальная эффективность их эксплуатации зачастую ниже проектных оценок.

Таким образом, целью разработки методики прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин является создание инструмента, позволяющего отечественным предприятиям лесного машиностроения совершенствовать свои машины в направлении большей специализированности и соответствия друг другу в рамках единого комплекса, управлять их потребительскими качествами [3, 4] и предлагать модификации базовых машин под конкретные природно-производственные условия.

Лесозаготовители к тому же получают методику, позволяющую прогнозировать эффективность проведения лесозаготовок в заданных условиях, а также быть уверенными, что эксплуатационные характеристики выбранного комплекса машин являются рациональными.

Основная часть. ***Структура методики.*** Предлагаемая методика состоит из следующих структурных блоков, реализованных в авторских компьютерных математических моделях.

1. *Блок условий эксплуатации.* В него вносятся данные о типологических и физико-механических свойствах почвогрунтов, макро- и микрорельефе местности, таксационных характеристиках древостоев. Результатом работы блока являются матрицы показателей названых условий эксплуатации: породы и возраста деревьев, таксационного диаметра, класса бонитета, полноты, диаметров сучьев и их распределения по стволам, распределения стволов по лесосеке, показателей несущей способности грунтов и высотных отметок, размещенных на участках лесосек по заданным законам распределения.

2. *Блок общего моделирования технологического процесса.* Исходными данными для него являются результаты работы блока условий эксплуатации, технологические и лесохозяйственные требования к работе машин. Результат работы блока – выбор базовой технологии и типов машин для ее реализации. Базовые технологии разработки лесосек комплексами многооперационных лесозаготовительных машин составлены под руководством авторов в 2021–2023 гг. по заданию отраслевой научно-технической программы Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь «Сохранение устойчивого развития лесов с учетом изменения климата».

3. *Блок моделирования технологических операций.* Основан на авторских математических моделях многооперационных лесозаготовительных машин. С его помощью устанавливаются: время проведения отдельных и совмещенных операций, затраченная на их реализацию энергия и выполненная полезная работа, динамические нагрузки в звеньях и узлах машин. Математические модели позволяют варьировать тип машины (харвестер, форвардер, рубильная

машина, комбинированные машины на их основе), а также параметры конструкции: шасси, технологическое оборудование и рабочие органы. К примеру, для манипулятора это кинематическая схема, грузоподъемность, поворотный момент и вылет манипулятора, массово-геометрические характеристики его отдельных звеньев, расположение и параметры исполнительных звеньев гидропривода, гидравлическая схема их питания (в том числе характеристики секций гидрораспределителя и гидронасосов) и др. Для харвестерных головок помимо параметров привода их исполнительных механизмов устанавливаются массово-геометрические параметры в целом, гидравлические и механические характеристики гидромоторов с вальцами (гусеницами) протяжки, геометрические параметры сучкорезных ножей, параметры контакта ствола дерева с несущей конструкцией, вальцами и сучкорезными ножами, параметры пильного механизма. Ввиду быстротечности процесса срезания сучьев с деревьев, существенной продолжительности моделирования такого процесса и высоких требований к аппаратной части компьютера данные, необходимые для работы подмодели харвестерной головки были получены предварительно методами конечно-элементного моделирования с последующей их проверкой в натурных экспериментах. Полученные результаты внесены в подмодель в виде эмпирических зависимостей.

Для базовых шасси варьируемыми параметрами, помимо массово-геометрических характеристик отдельных узлов и агрегатов и их пространственного расположения на несущей конструкции, явились колесная формула и упруго-демпфирующие характеристики движителя, характеристики взаимодействия движителя с лесными почвогрунтами, пространственное расположение мест установки технологического оборудования, упругие и демпфирующие свойства элементов несущей конструкции, пространственное положение оператора, параметры подрессоривания его рабочего места и др.

4. *Блок анализа эксплуатационных свойств* работает параллельно с блоком моделирования технологических операций и при недостаточности определенных эксплуатационных свойств корректирует работу блоков общего моделирования технологического процесса и моделирования технологических операций. К примеру, ограничивает вылет манипулятора при недостаточной устойчивости машины и изменяет в соответствии с этим ширину полупасек и количество технологических коридоров.

5. *Блок оценки ресурса конструкции.* Здесь используются данные о динамических нагрузках в отдельных звеньях и узлах машин, получаемые из блока моделирования технологических операций. В нем предусмотрена реализация двух подходов к оценке ресурса. Оба основаны на предварительной схематизации процесса нагружения [5]. Первый подход предоставляет большую точность оценки, но является более трудоемким и может использоваться только при наличии трехмерной модели оцениваемой конструкции. При нем выполняется моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции под действием исходной последовательности нагрузок. Методами, изложенными в публикации [6], оценивается ресурс конструкции в виде количества циклов заданной схемы нагружения до потери прочности или до критического износа, требующего ремонта. Найденное количество циклов нагружения интерпретируется в величину продолжительности безотказной работы и в дальнейшем используется при оценке эффективности комплекса лесозаготовительных машин в виде коэффициента готовности.

Второй подход основан на прогнозе ресурса анализируемой конструкции в сравнении с оценкой степени повреждаемости подобной опытной конструкций [7]. Такой подход более приемлем при необходимости проведения расчетов с большой выборкой начальных условий эксплуатации и сравнения разнообразных технологий, а также при многочисленных вариантах конструкций машин. Как правило, такая оценка выполняется на начальном этапе анализа.

6. *Блок данных о квалификации оператора*. Эффективность эксплуатации лесозаготовительных машин значительно зависит от подготовки и опыта оператора, его психоэмоционального состояния, утомляемости и т. д. [8, 9]. На протяжении 2021–2023 гг. на кафедре ЛМДиТЛП проводился сбор и анализ данных о 157 операторах многооперационных машин. Полученные данные позволили установить влияние возраста, стажа, условий работы, ее непрерывной продолжительности и времени суток на способность отдельных групп операторов реализовывать ряд приемов и способов выполнения операций, а также долговременно поддерживать определенный технический уровень их исполнения.

7. В *блоке оценки эффективности и прогнозирования* на основе данных, полученных из предыдущих блоков, с использованием изложенного ниже критерия выполняется оценка эффективности комплекса лесозаготовительных машин в заданных природно-производственных условиях эксплуатации. Также возможен анализ для группы условий или в изменяющихся условиях. При этом работа предыдущих блоков повторяется необходимое количество раз с разными начальными условиями, после чего выполняется оценка эффективности для всей группы с учетом вероятности эксплуатации машин в них.

Критерий оценки эффективности комплекса лесозаготовительных машин. При разработке методики выдвинута гипотеза о том, что вся совокупность эксплуатационных свойств лесозаготовительных машин и их оценочных показателей на практике определяет ограниченное число эксплуатационных потребительских качеств:

– эксплуатационную надежность;
– производительность;
– экономичность;
– безопасность;
– экологичность.

Анализ изложенных потребительских качеств позволил установить, что все они могут быть оценены величинами полезно выполненной работы (Дж или м^3), затраченной энергии (Дж или кг топлива) и времени (с или смен).

Практическая оценка эксплуатационной надежности ограничивается определением времени безотказной работы машин за длительный срок и времени на восстановление работоспособного состояния. Производительность находится как объем полезной работы, выполненный в единицу времени, экономичность – как энергетические затраты на обеспечение заданной производительности.

При этом должен обеспечиваться дополнительный ряд условий: безопасности работы как способности выполнять определенный круг технологических операций без причинения вреда здоровью оператора и экологичности [10] как допустимого уровня вредного воздействия на лесные экосистемы, не связанного с непосредственным изъятием заготавливаемой древесно-кустарниковой растительности. К подобным экологическим ограничениям следует относить допустимую глубину колеи, образуемую за несколько проходов машин, степень минерализации почв, повреждающее воздействие движителей на напочвенный покров и корневые системы, воздействие на стволы и кроны оставляемых на доращивание деревьев и др.

В основу интегральной оценки рассмотренных потребительских качеств положен критерий энергетического потенциала производительности (ЭПП), предложенный в ранних работах авторов [11, 12] (с выводом и физическим смыслом критерия можно ознакомиться в работах [13, 14]). Однако в рамках данной методики он обладает существенными особенностями. Так, базовый критерий удельного ЭПП (УЭПП) был предназначен для оценки эффективности выполнения отдельных операций технологического цикла лесозаготовок и представлял собой следующую зависимость:

$$\text{УЭПП} = \frac{A_{\text{полезн}}}{\left(E_{\text{полн}}\right)T},$$

где $A_{\text{полезн}}$ – полезная работа, выполненная на соответствующей операции технологического цикла, Дж; $E_{\text{полн}}$ – энергия, затраченная на выполнение полезной работы, Дж; T – время выполнения соответствующей операции технологического цикла, с.

Дальнейшие исследования позволили установить, что полезно выполненная лесозаготовительной машиной работа и затраченная на это энергия должны определяться не только для самых энергоемких и продолжительных операций, но и для всей их совокупности в одном технологическом цикле с учетом последовательности выполнения при заданной технологии работы. При таком подходе стало возможным использовать критерий УЭПП для анализа эффективности технологических циклов работы многооперационных машин в целом:

$$\text{УЭПП}_{\text{ц}} = \frac{\sum A^{\text{ц}}_{\text{полезн}}}{\left(\sum E^{\text{ц}}_{\text{полн}}\right)T_{\text{ц}}},$$

где $\sum A^{\text{ц}}_{\text{полезн}}$ – сумма полезных работ, выполненных по каждой последовательной операции технологического цикла, Дж; $\sum E^{\text{ц}}_{\text{полн}}$ – сумма энергий, затраченных на выполнение работ в технологическом цикле, Дж; $T_{\text{ц}}$ – продолжительность технологического цикла многооперационной машины, с. При одновременном выполнении нескольких технологических операций (совмещении операций), учитывается общее время совмещения.

Исходные данные для проведения такого анализа получают либо посредством компьютерного имитационного математического моделирования работы многооперационной машины [15], либо экспериментальным путем [16, 17]. Для этого наряду с ранее созданными авторами математическими моделями отдельных операций использовались модели, позволившие рассмотреть работу машин целиком и параллельно с определением энергетических характеристик операций получать данные о динамическом нагружении отдельных узлов, в том числе рабочего органа, манипулятора, базового шасси и их силовых приводов. Это дало возможность не только оценить «базовую» эффективность технологического цикла многооперационной машины, но и дать расширенную оценку эффективности с учетом характера нагружения конструкции и вероятности пребывания ее в работоспособном состоянии:

$$\text{УЭПП}_{\text{ц}} = \frac{\sum A^{\text{ц}}_{\text{полезн}}}{\left(\sum E^{\text{ц}}_{\text{полн}}\right)\dfrac{T_{\text{ц}}}{K_{\text{гот}}}}, \qquad (1)$$

где $K_{\text{гот}}$ – коэффициент готовности машины.

Таким образом, энергопотребление многооперационной машины, производимая ей полезная работа, затраты времени на выполнение каждой операции и возникающие при этом нагрузочные

режимы связаны между собой единым оценочным критерием. Однако выражение (1) допускает оценку лишь для постоянных природно-производственных условий. В практике реального лесозаготовительного производства условия эксплуатации постоянно изменяются [18], а эффективность работы каждой последующей машины лесозаготовительного комплекса зависит от работы предыдущей. К примеру, повышение эффективности работы харвестера, часто достигается за счет исключения операции подсортировки сортиментов или путем сокращения операций по перемещению сваленого дерева. Это приводит к существенному падению эффективности следующего за ним в технологической цепочке форвардера и, как следствие, всего комплекса лесозаготовительных машин. Поэтому при прогнозировании эффективности реального лесозаготовительного производства с применением конкретных многооперационных машин, работающих по конкретной технологии, а также при решении обратной задачи, подборе параметров машин под конкретное производство важно оценивать эффективность совместной работы всех машин лесозаготовительного комплекса во всем диапазоне потенциальных эксплуатационных условий.

Для этого критерий УЭПП преобразован в комплексный интегральный показатель производственной эффективности:

$$\text{ЭП} = \sum_{d=1}^{m}\sum_{f=1}^{r}\frac{\sum_{i=1}^{n} A_i B\left(d_{1,3}\right) C\left(f\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n} E_i\right)\left(\frac{T_{\text{Х}}}{K_{\text{готХ}}}+\frac{T_{\text{Ф}}}{K_{\text{готФ}}}\right)}, \qquad (2)$$

где d – порядковый номер совокупности таксационных показателей древостоя; f – порядковый номер совокупности условий движения; $B(d_{1,3})$ – 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; $T_{\text{Х}}$, $T_{\text{Ф}}$ – время выполнения операций харвестера и форвардера соответственно; $K_{\text{готХ}}$, $K_{\text{готФ}}$ – коэффициент готовности харвестера и форвардера при эксплуатации в заданной совокупности природно-производственных условий соответственно.

Представленный критерий предусматривает работу лесозаготовительного комплекса «харвестер + форвардер», но не ограничивается лишь данными машинами. Он может быть легко дополнен рубильной машиной [19] либо комплексом машин для очистки лесосек от порубочных остатков.

Заключение. В настоящей статье изложены наиболее важные аспекты методики прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин. В основе методики лежит гипотеза о том, что все эксплуатационные свойства лесозаготовительных машин и их оценочные показатели на практике определяют ограниченное число эксплуатационных потребительских качеств: эксплуатационную надежность, производительность, экономичность, безопасность и экологичность. Все они могут быть оценены величинами полезно выполненной работы, затраченной энергии и времени. Эти величины собраны в единый оценочный критерий энергетического потенциала производительности. Данные для расчета критерия могут быть получены как экспериментальным путем, так и теоретически на основе математического моделирования технологий работы, конструкций машин, энергопотребления и ресурса.

В статье изложен порядок использования методики при получении данных теоретическим путем. Она разбита на ряд блоков, отвечающих за моделирование условий эксплуатации, общее моделирование технологического процесса, моделирование технологических операций, анализ эксплуатационных свойств, оценку ресурса машин, анализ подготовленности операторов и в целом за прогнозирование эффективности на основе работы предыдущих блоков.

Даны ссылки на предыдущие работы авторов, в которых приводятся математические модели, лежащие в основе функционирования отдельных блоков методики, раскрывается вывод оценочного критерия, рассматриваются вопросы оценки ресурса конструкций многооперационных лесных машин. Дополнительно приведены ссылки на научные работы сотрудников кафедры ЛМДиТЛП БГТУ, отечественных и зарубежных коллег в смежных направлениях.

Список литературы

1. Жуков А. В. Теоретические основы выбора технических параметров и улучшения эксплуатационных свойств специальных лесных машин: дис. … д-ра техн. наук: 05.21.01. Л., 1987. 315 л.

2. Матвейко А. П., Федоренчик А. С. Технология и машины лесосечных работ. Минск: Технопринт, 2002. 480 с.

3. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Основы проектирования лесных машин и системы автоматизированного проектирования. Минск: БГТУ, 2015. 139 с.

4. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Комплексная техническая оценка потребительских качеств лесных машин // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 67–70.

5. Шмелев А. В. Совершенствование методов схематизации случайных процессов нагружения и расчета усталостной долговечности несущих конструкций грузовых автомобилей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. Минск, 2010. 22 с.

6. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Evaluation of Loading Dynamics of Fatigue Life for a Forwarder Half-Frame Articulation // Journal of Machinery Manufacture and Reability. 2017. No. 5. P. 463–471.

7. Никитин И. С., Бураго Н. Г., Никитин А. Д. Повреждаемость и усталостное разрушение элементов конструкций в различных режимах циклического нагружения // Прикладная математика и механика. 2022. Т. 86, № 2. С. 257–271.

8. Ovaskainen H. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. Dissertationes Forestales. Joensuu, 2009. 63 p.

9. Петренко Н. В. Работа оператора зерноуборочного комбайна – основа повышения его производительности // Техника и оборудование для села. 2010. № 4 (154). С. 45–61.

10. Протас П. А., Мисуно Ю. И. Структурная схема и критерии оценки эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами // Труды БГТУ. 2016. № 2 (184): Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 248–253.

11. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Эффективность работы многооперационных лесозаготовительных машин с учетом ограничивающих факторов // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 8–11.

12. Голякевич С. А. Применение систем адаптивного управления для повышения реализации энергетического потенциала харвестерами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2017. № 2 (198). С. 238–244.

13. 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.

14. Гинзбург Ю. В., Швед А. И., Парфенов А. П. Промышленные тракторы. М.: Машиностроение, 1986. 296 с.

15. Голякевич С. А. Имитационное моделирование технологического оборудования форвардера как мехатронной системы // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (222). С. 174–180.

16. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Экспериментальные исследования нагруженности несущих конструкций шарнирно-сочлененных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 15–17.

17. Пищов С. Н., Мохов С. П., Голякевич С. А. Результаты экспериментальных исследований устойчивости и проходимости автомобиля-самосвала МАЗ 5516W4 // Оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 14–15 апр. 2016 г. Могилев, 2016. С. 164–165.

18. Федоренчик А. С., Корзун И. И. Типизация природно-производственных условий лесозаготовительных районов Беларуси // Труды БГТУ. Сер. VII, Экономика и управление. 2001. Вып. IX. С. 148–153.

19. Мохов С. П., Германович А. О. Анализ конструктивных особенностей рубильных машин // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 40–44.

References

1. Zhukov A. V. *Teoreticheskiye osnovy vybora tekhnicheskikh parametrov i uluchsheniya ekspluatatsionnykh svoystv spetsial'nykh lesnykh mashin. Dissertatiya doktora tekhnicheskih nauk* [Theoretical bases of a choice of technical parameters and improvement of operational properties of special forest machines. Dissertation DSc (Engineering)]. Leningrad, 1987. 315 p. (In Russian).

2. Matveiko A. P., Fedorenchik A. S. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines for logging operations]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2002. 480 p. (In Russian).

3. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. *Osnovy proyektirovaniya lesnykh mashin i sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya* [Basics of forest machinery design and computer-aided design]. Minsk, BSTU Publ., 2015. 139 p. (In Russian).

4. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Comprehensive technical assessment of consumer qualities of forest machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 67–70 (In Russian).

5. Shmeliov A. V. *Sovershenstvovaniye metodov skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya i rascheta ustalostnoy dolgovechnosti nesushchikh konstruktsiy gruzovykh avtomobiley. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskih nauk* [Improving methods for schematizing random loading processes and calculating the fatigue life of load-bearing structures of trucks. Abctract of thesis PhD (Engineering)]. Minsk, 2010. 22 p. (In Russian).

6. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Evaluation of Loading Dynamics of Fatigue Life for a Forwarder Half-Frame Articulation. *Journal of Machinery Manufacture and Reability*, 2017, no. 5, pp. 463–471.

7. Nikitin I. S., Burago N. G., Nikitin A. D. Damage and fatigue failure of structural elements in various cyclic loading modes. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied mathematics and mechanics], 2022, vol. 86, no. 2, pp. 257–271 (In Russian).

8. Ovaskainen H. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. Dissertationes Forestales. Joensuu, 2009. 63 p.

9. Petrenko N. V. The work of a combine harvester operator is the basis for increasing its productivity. *Machinery and equipment for rural areas*, 2010, no. 4 (154), pp. 45–61 (In Russian).

10. Protas P. A., Misuno Yu. I. Structural scheme and the criteria for assessing the operational and environmental forest machines compatible with soils. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 248–253 (In Russian).

11. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Efficiency of operation of multi-operational forestry machines taking into account limiting factors. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 8–11 (In Russian).

12. Golyakevich S. A. Application of adaptive control systems to increase the realization of energy potential of harvesters. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2017, no. 2 (198), pp. 238–244 (In Russian).

13. Golyakevich S. A. *Povysheniye nadezhnosti nesushchikh konstruktsiy mnogooperatsionnykh lesnykh mashin vyborom rezhimov raboty na osnove energeticheskogo potentsiala. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Increasing the reliability of load-bearing structures of multi-operation forest machines by selecting operating modes based on the energy potential. Abstract of thesis PhD (Engineuring)]. Minsk, 2013. 27 p. (In Russian).

14. Ginzburg Yu. V., Shved A. I., Parfenov A. P. *Promyshlennyye traktory* [Industrial trakors]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1986. 296 p. (In Russian).

15. Golyakevich S. A. Simulation modeling of technological equipment of a forwarder as mechatronic system. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 2 (222), pp. 174–180 (In Russian).

16. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R. Experimental studies of the load on load-bearing structures of articulated forestry machines. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 15–17 (In Russian).

17. Pishchov S. N., Mokhov S. P., Golyakevich S. A. Results of experimental studies of stability and cross-country ability of a MAZ 5516W4 dump truck. *Oborudovaniye i resursosberegayushchiye tekhnologii* [Materials, equipment and resource-saving technologies]. Mogilev, 2016, pp. 164–165 (In Russian).

18. Fedorenchik A. S., Korzun I. I. Typing the natural-production conditions of harvesting areas in Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series VII, Economics and Management, 2001, issue IX, pp. 148–153 (In Russian).

19. Mokhov S. P., Germanovich A. O. Analysis of the design features of chipping machines. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 40–44 (In Russian).

Информация об авторах

Голякевич Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. 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, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: arg@belstu.by

Коробкин Владимир Андреевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Тракторы». Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, Республика Беларусь). E-mail: trak_atf@bntu.by

Information about the authors

Golyakevich Sergey Alexsandrovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production 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, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: arg@belstu.by

Korobkin Vladimir Andreevich – DSc (Engineering), Professor, the Department of Tractors. Belarusian National Technical University (65, Nesavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: trak_atf@bntu.by

Поступила 23.10.2023