

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ХАРВЕСТЕРА

А.П. Мохирев<sup>1</sup>✉, О.А. Куницкая<sup>2</sup>, Г.А. Калита<sup>3</sup>, Н.Н. Вернер<sup>4</sup>, В.В. Швецова<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», 677007, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ш. Сергеляхское, 3 км., д. 3

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова», 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5

<sup>5</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

ale-mokhirev@yandex.ru

Приведен расчет параметров надежности лесозаготовительной валочно-сучкорезно-раскряжевой машины (харвестера Ponsse-ERGO), эксплуатация которой проводилась на территории Красноярского края. Оценены отдельные элементы машины. За время наблюдений (10 500 ч) у каждого узла выявлено некоторое число отказов и среднее время восстановления. По результатам расчетов построена диаграмма вероятностей состояний системы харвестера и диаграмма Парето (накопленная вероятность отказов систем). По расчетам определено, что наибольшая вероятность отказов приходится на гидравлическую систему трансмиссии и гидроманипулятора — элементы основной нагрузки при эксплуатации машины. Представлен подробный анализ причин отказа лесозаготовительной машины в процессе ее эксплуатации. Выявлены основные причины отказа гидравлической системы и наиболее частая причина остановки харвестера во время работы. Для увеличения работоспособности и долговечности харвестера рекомендуется оптимизировать условия эксплуатации, оптимальный подбор конструкторского материала, обладающего более высокими техническими характеристиками, упрочняющими саму деталь и ее поверхность изнашивания.

**Ключевые слова:** вероятность состояний, работоспособность, долговечность, харвестер

**Ссылка для цитирования:** Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калита Г.А., Вернер Н.Н., Швецова В.В. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 5. С. 93–101. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-93-101

Технико-экономическая эффективность функционирования лесных машин в значительной степени определяется их техническими характеристиками, в том числе показателями эксплуатационной надежности.

Достигнутого уровня указанных показателей не всегда достаточно для обеспечения соответствия их современным потребительским требованиям [1], а именно, растущим рабочим нагрузкам, точности работы, скоростям и ускорениям движения рабочих органов. В связи с этим необходимо повышать работоспособность машин, используемых в лесном комплексе, в значительной степени лимитируемой недостаточным уровнем износостойкости составляющих их узлов и деталей [2, 3].

К лесозаготовительной технике относится широкий перечень машин, применяемых при валке и первичной обработке древесины, которые предназначены для валки деревьев, обрезки сучьев, группировки и транспортировки стволов, их поперечной распиловки (раскряжевки), иногда измельчения поваленных деревьев (чипперы).

Основные требования, предъявляемые к указанной технике, помимо высокой эксплуа-

ционной надежности включают в себя климатоустойчивость, универсальность, высокую маневренность, многофункциональность и транспортную проходимость [3–7].

Конструктивно эти машины обеспечивают механизацию цикла заготовки древесины, начиная от валки деревьев и заканчивая ее первичной обработкой. Кроме того, технические возможности указанной техники должны гарантировать устранение травматизма, существенное улучшение условий труда на лесозаготовках, а также повышение производительности и технико-экономических показателей работы.

Высокие требования к надежности указанной техники обусловлены тем, что ее эксплуатация осуществляется в труднодоступных местах, вдали от ремонтных и сервисных подразделений [8, 9], что приводит к возникновению существенных сложностей даже при незначительных поломках. А простой техники вследствие ее отказов вызывают, как правило, значительные экономические потери [10].

Харвестер — это машина, которая на сегодняшний день представляет собой одну из главных частей современного лесозаготовительного комплекса [11]. Машина универсальна и может заменить большую бригаду рабочих [12],

что позволяет ей работать в разы эффективнее и преодолевать затрудненные участки благодаря повышенной проходимости [13, 14].

Особенностью системы работы харвестера является гидростатический привод: два насоса, которые расположены рядом с двигателем. Один из насосов работает на навесное оборудование (харвестерную головку и гидроманипулятор), а другой — на трансмиссию машины.

Харвестер имеет шарнирно-сочлененную конструкцию рамы, что обеспечило ее проходимость по труднодоступным и тяжелопроходимым участкам, в частности по заболоченной местности, глубокому снегу, при перепадах высот и неровностях дорог и др. [15].

Главным механизмом исполнения команд оператора служит харвестерная головка, которая управляется из кабины с помощью бортового компьютера. Харвестерная головка приводится в движение с помощью гидравлической системы [16].

В современном машиностроении главное внимание уделяется увеличению долговечности деталей лесозаготовительной техники в условиях интенсивного износа [17], разработке разнообразия конструктивных и технологичных методов повышения износостойкости агрегатов техники [18, 19].

## Цель работы

Цель работы — определение надежности элементов лесозаготовительного харвестера, эксплуатируемого в условиях Красноярского края.

## Материалы и методы исследования

Основными в методе являются сбор и обработка информации по ремонтпригодности, износостойкости и в целом надежности отдельных деталей и узлов машины. На качество сбора и обработки исходной информации влияет работоспособность применяемых методов и получаемый результат.

Начальный этап эксплуатации лесозаготовительной техники служит общим отсчетом ресурсов всех отдельных деталей, узлов и системы в целом. В начале работы лесозаготовительная техника состоит их заводских деталей и узлов, у которых вероятность выхода из строя намного меньше, чем уже восстановленных или отремонтированных элементов в процессе сервисного обслуживания. По мере изнашивания узлов происходит замена деталей, и, следовательно, поток отказов будет постепенно увеличиваться, и, в конечном итоге, перейдет в установившийся.

Суммарная интенсивность  $\lambda_0$  установившегося потока отказов системы будет складываться из интенсивностей потоков, они включены последовательно и при отказе элементов отказывает вся система:

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

Все выходы из строя деталей сложной восстанавливаемой системы в основном не связаны один с другим, и наработка между выходами из строя является случайной величиной, получаемой процессом без последствия и распределенной по экспоненциальному закону. Нарботки на отказ можно рассчитать по формуле

$$\bar{T}_{от} = \frac{t}{n},$$

где  $t$  — количество наблюдений, ч;

$n$  — число отказов.

„Вероятность, что ремонтные работы потребуются на промежутке времени  $T$  непрерывной эксплуатации, описывает выражение

$$P = \frac{\bar{T}_{от}}{\bar{T}_{от} + \bar{T}_в},$$

где  $\bar{T}_{от}$  — средняя наработка машины на отказ;

$\bar{T}_в$  — среднее время восстановления работоспособности (простоя в неплановом ремонте).

Интенсивность потока восстановлений  $\mu_i$  определяется по уравнению

$$\mu_i = \frac{1}{T_{вi}},$$

где  $T_{вi}$  — время восстановления работоспособности машины после отказа  $i$ -го элемента.

Интенсивность потока отказа  $\lambda_i$  можно рассчитать по формуле

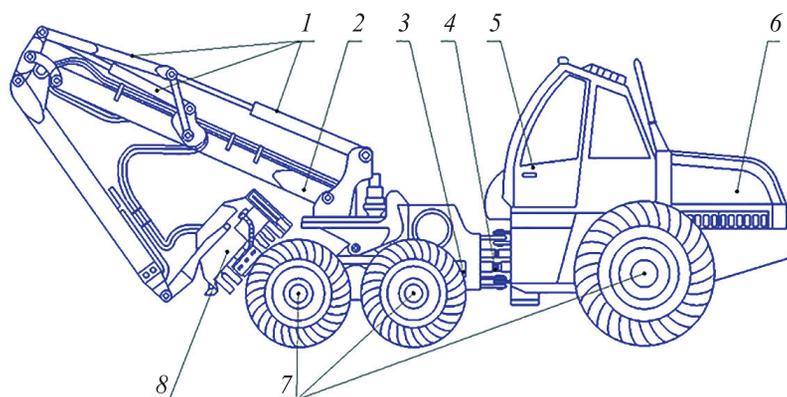
$$\lambda_i = \frac{1}{T_{отi}},$$

где  $T_{отi}$  — время наработки на отказ.

Суммарное время восстановления после отказа составляет

$$\sum T_в = T_в n.$$

Используем теорию массового обслуживания для описания вероятностей состояний машины на основании информации об интенсивностях  $\lambda_i$  потоков отказов и восстановлений  $\mu_i$  отдельных из  $n$ -го количества сборочных единиц. Машина состоит из большого числа элементов, отказ которых в процессе эксплуатации устраняют неплановым ремонтом. Поочередно в случайные моменты времени машина из работоспособного состояния ( $S_0$ ) может переходить в состояние отказа первого ( $S_1$ ) или второго элемента, вплоть до  $S_n$ . Время простоя в неплановом ремонте также является случайной величиной, зависящей от характера повреждений элемента, наличия запасных частей. Если принять поток отказов и



**Рис. 1.** Оцениваемые узлы харвестера: 1 — гидравлическая система манипулятора; 2 — манипулятор; 3 — гидравлическая система трансмиссии; 4 — шарнирное сочленение; 5 — система управления; 6 — двигатель; 7 — трансмиссия (ходовая часть); 8 — харвестерная головка

**Fig. 1.** Assessed harvester units: 1 — hydraulic system of the manipulator; 2 — manipulator; 3 — hydraulic transmission system; 4 — articulation; 5 — control system; 6 — engine; 7 — transmission (chassis); 8 — harvester head

восстановлений простейшими, то машину можно рассматривать как систему массового обслуживания (СМО) [20].

В целях оценки надежности осуществлялись наблюдения за работой харвестера Ponsse-ERGO в летнее и зимнее (преимущественно) время года на территории Нижнего Приангарья в Красноярском крае. Наблюдения проводились за такими основными узлами лесозаготовительной машины, как гидравлические системы трансмиссии и манипулятора, двигатель, харвестерная головка, система управления, трансмиссия (ходовая часть), сочленение ходовой части, манипулятор (механическая часть) (рис. 1). Длительность наблюдений составляла 10 500 ч. За это время у каждого узла были выявлены некоторое число отказов и среднее время восстановления после отказа узла.

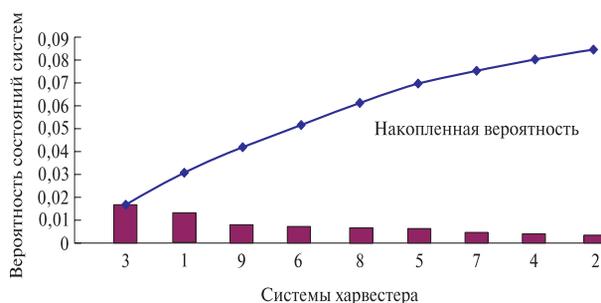
Для обработки полученных данных применяли пакет программ Microsoft Office Excel, при этом достоверность составляла 95 %.

## Результаты и обсуждение

По представленной выше методике выполнены расчеты надежности каждого узла в отдельности (таблица, см. рис. 1). Исследуемые системы представлены в таблице в порядке уменьшения вероятности состояний.

На рис. 2 показана диаграмма вероятностей состояний системы харвестера и диаграмма Парето (накопленная вероятность отказов систем).

Из рис. 2 видно, что наибольшая вероятность отказов приходится на гидравлические системы трансмиссии и гидроманипулятора, поскольку именно на них приходится основная нагрузка при эксплуатации машины [21]. Эксплуатация



**Рис. 2.** Графическая интерпретация результатов расчета вероятностей состояний систем харвестера: 1–9 — см. таблицу

**Fig. 2.** Graphical interpretation of the state probabilities calculations of the harvester systems: 1–9 — see the table

лесозаготовительной техники затруднена тем, что машина используется в процессе всего сезона в тяжелых природно-климатических условиях, преимущественно (60...65 %) в зимнее время, т. е. при довольно низкой температуре воздуха (–45 °С), что затрудняет работу гидросистемы харвестера [22]. Еще одним затрудняющим фактором эксплуатации машины в зимний период времени являются обильные осадки в виде снега. Глубина снежного покрова может достигать более 1 м, поэтому перемещение по лесосеке затруднительно даже на высокопроходимой технике. В весенне-осеннее время работы на харвестере проводятся в условиях высокой влажности почвогрунта и большого объема грязи. Предзимний период для работы харвестера наиболее благоприятен, поскольку почвогрунт подмерзает, а температура воздуха еще не такая низкая, как зимой. Это позволяет больше эксплуатировать машину, так как коэффициент динамичности увеличивается в 1,5 раза.

**Расчеты вероятностей состояний**  
State probability calculations

№ системы	Система харвестера Ergo	Зафиксированное число отказов	Суммарное время восстановления после отказов, ч	Средняя наработка на отказ, $T_{отв}$	Среднее время восстановления после отказа, $T_{в}$	Интенсивности потоков		$\lambda_i / \mu_i$	Вероятность состояний $P_i$
						$\lambda_i$	$\mu_i$		
3	Гидравлическая система трансмиссии	9	187	1166,7	20,8	0,00086	0,04807	0,01789	0,01752
1	Гидравлическая система манипулятора	10	168	1050	16,8	0,00095	0,0595	0,01600	0,01575
9	Прочее	34	126	308,8	3,7	0,00324	0,26984	0,01200	0,01098
6	Двигатель	3	115	3500	38,3	0,00029	0,0261	0,01111	0,01083
8	Харвестерная головка	8	106	1312,5	13,3	0,00076	0,0751	0,01010	0,01003
5	Система управления	14	98	750	7	0,00133	0,143	0,0093	0,00925
7	Трансмиссия (ходовая часть)	8	63	1312,5	7,9	0,00076	0,1296	0,006	0,00598
4	Шарнирное сочленение	4	57	2625	14,3	0,00038	0,06993	0,005434	0,00542
2	Манипулятор (механическая часть)	7	53	1500	7,6	0,00067	0,1316	0,00509	0,005041
	Среднее	11	108	1502,83	14,4				
	Сумма	97	973	13525,5	129,7	0,00924	0,953	0,0929	0,0908
							$P_b =$	0,9092	1

*Примечание.* Производительность наблюдений — 10 500 ч работы.

Работа харвестера связана с большим количеством переходных циклических процессов. При валке дерева происходит контакт харвестерной головки со стволом, при обрезке сучьев и при раскряжке контактируют соответственно сучкорезные ножи и пильная гарнитура харвестерной головки. При динамических нагрузках существенное влияние на оборудование лесозаготовительной машины оказывают пересеченный рельеф местности, остатки выступающей части деревьев (пни, корневые системы), состав и физико-механические свойства почвогрунтов, силовое воздействие со стороны ветра.

Одним из основных факторов, влияющих на причину поломки харвестера, является контакт с обрабатываемыми деревьями. Непосредственный контакт происходит со стволом дерева и его кроной, подростом, пнями и сортиментами. Все эти контакты могут вызвать довольно большое количество повреждений, во избежание которых необходимо предусматривать специальную защиту элементов, и особенно гидравлические системы машины. Кроме того, таксационные характеристики на лесосеке характеризуются большим разнообразием весовых и геометрических

параметров деревьев (от 10 и более). Также встречается некоторое число «нерасчетных деревьев и сучьев», которые, в свою очередь, контактируют с лесозаготовительной техникой и выводят ее из строя.

Сервисное обслуживание лесозаготовительной техники в лесу происходит с некоторыми затруднениями вследствие тяжелых погодных условий, большого расстояния до ремонтной базы, необходимости ожидания мастера по сервисному обслуживанию, не всегда соответствующего достаточной квалификации [23].

Опыт эксплуатации показывает, что все повреждения и выходы из строя лесозаготовительных машин можно подразделить на отказы гидравлической системы и отказы металлоконструкции. В свою очередь, отказы металлоконструкции подразделяются еще на несколько видов: остаточная деформация, вязкий, усталостный и хрупкий изломы.

Остаточную деформацию обнаружить несложно, поскольку изменяются геометрические формы и размеры детали или узла в целом, что обуславливает их удлинение, изгиб, вмятины, скручивание и др. Часто такие повреждения происходят

в неподготовленной захламленной лесосеке, со сложными условиями. В этом случае наиболее уязвимым узлом харвестера будет трансмиссия, которая выходит из строя вследствие столкновения с оставленным валежником и пнями. При этом повреждаются даже элементы кабины.

Главная причина выхода из строя узла харвестера при вязком изломе состоит в резких перегрузках, которые возникают при несоблюдении или незнании максимально допустимых нагрузок на узел техники, при нарушении правил эксплуатации лесозаготовительной техники. При вязком изломе выход из строя детали или узла происходит внезапно в результате потери прочности. Разрушения при этом сопровождаются макроскопическими деформациями в значительной степени, на поверхности площадки разрушения появляются сколы, неровности и др.

При усталостном изломе выход из строя в большинстве случаев происходит по причине длительного воздействия многочисленных циклических нагрузок, которое сопровождается образованием трещин. Поверхность детали имеет зоны с ускоренным развитием трещины, излома и в конечном итоге долома. Основными причинами, при которых происходит отказ техники, являются длительное воздействие знакопеременной нагрузки, пониженная прочность материала детали, наличие на поверхности макротрещин, надрезов, неметаллических включений и др.

Выход из строя по причине хрупкого излома случается вследствие малых макроскопических деформаций. В этом случае поверхность излома направлена перпендикулярно максимальным растягивающим напряжениям и имеет кристаллическое строение с рубцами, лучеобразно расходящимися из зоны начала разрушения. Чаще всего выход техники из строя обуславливают дефекты, возникающие при термической обработке, превышении ударных нагрузок, хладноломкости стали, неудовлетворительном качестве материала (повышенном содержании в составе водорода, фосфора). Все эти факторы приводят к тому, что безотказная работа харвестера определяется сопротивлением металла хрупкому излому, а так же на сколько быстро происходят изменения в окружающей среде.

Чуть больше 1/3 отказов в лесозаготовительной технике приходится на гидросистему. Основными причинами здесь служат: нарушение герметичности трубопроводов соединений, повышенный износ подвижных элементов узла, загрязнение гидравлической жидкости, не всегда удовлетворительная работа сервисного персонала.

Причины, по которым гидросистема подвержена большому количеству отказов, состоят в большой протяженности всей системы, состав-

ляющей около 10 м. При этом основная часть работы харвестера происходит в зимний период, т. е. при тяжелых природно-климатических условиях. Отрицательные температуры (до  $-45^{\circ}\text{C}$ ) и сильные ветры приводят к тому, что упругость обдуваемых со всех сторон рукавов, шлангов, уплотнителей изменяется в худшую сторону, появляются трещины, изменяющие давление в гидросистеме и, следовательно, оборудование выходит из строя.

Опасность представляет также повышения температуры внутри самой гидросистемы. Это происходит вследствие износа, деформации трубопроводов, которые сказываются на дросселировании рабочей жидкости. Снижается вязкость масла до недопустимого уровня, нарушаются смазывающие свойства масел, уменьшаются упругие свойства уплотнений, увеличиваются протечки через зазоры и трещины. Последний фактор повышает выделение тепла в систему вследствие дросселирования рабочей жидкости в зазорах и трещинах, это приводит к уменьшению КПД работы гидросистемы.

Большая часть неисправностей гидросистемы происходит вследствие нарушения герметичности соединений, выхода из строя резиновых уплотнений, разрыва и надрыва рукавов и шлангов. Повышенные нагрузки и вибрации на металлических трубопроводах вызывают появление макротрещин, а при механических силовых повреждениях на поверхности детали появляются изгибы, вмятины, удлинения, что приводит к нарушению работы всей системы в целом. Также при нарушении герметичности во всасывающих гидромагистралях происходит попадание воздуха (пенообразование), а при надрывах и разрывах магистрали — потеря дорогостоящей рабочей жидкости и выход из строя гидравлической системы.

Анализ выходов из строя гидравлических систем лесозаготовительных машин позволил выявить некоторые причины потери работоспособности отдельных узлов. Например, в аксиально-поршневых насосах и гидродвигателях отказ наступает в результате износа сферической поверхности и искривления шатунов, износа торцевых поверхностей, поршневых отверстий и посадочных мест в блоке, износа шеек валов, центрального шипа, шлицевых и посадочных мест, износа поршней; в шестеренных насосах — в результате износа внутренней поверхности и посадочных мест корпуса и крышек, износа втулок; в лопастных насосах — в результате износа торцевой поверхности статоров и дисков, износа лопастей, цапф, торцов и пазов в роторах. К наиболее изнашиваемым местам в гидроцилиндрах относятся: внутренняя и торцевая поверх-

ность корпуса цилиндров, торцы и посадочные поверхности крышек, посадочная поверхность направляющих втулок, наружная поверхность плунжеров и поршней, резьбовые соединения и уплотнения [24].

Наиболее частой причиной остановки харвестера во время работы является отказ пильной гарнитуры [25]. Пильные цепи выходят из строя в основном по причине естественного износа, а также некачественного обслуживания. Значительно реже возникает обрыв цепи при столкновении с посторонним предметом в стволе дерева. Замена, правка цепи занимают несколько минут, однако снижают производительность харвестера. При среднем объеме хлыста 0,25 м<sup>3</sup> за 1 мин харвестер может заготовить 0,5 м<sup>3</sup> древесины. Как показывает опыт эксплуатации, для повышения надежности пильных гарнитур харвестеров следует нормировать максимальную наработку пильной цепи до 350 м<sup>3</sup>, а также более внимательно относиться к выбору пильных шин, наиболее подходящих под эксплуатацию конкретных пильных цепей в конкретных условиях эксплуатации.

## Выводы

Практически все выходы из строя лесозаготовительной техники и оборудования происходят по причине возникновения ошибок на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации. Работоспособность, безотказность и долговечность харвестера зависят от трения деталей и их изнашивания в процессе работы.

Повышения работоспособности и долговечности харвестера достигают путем оптимизации условий эксплуатации и оптимального подбора конструкторского материала, который обладает высокими техническими характеристиками, упрочняющими как саму деталь, так и поверхности изнашивания.

Сложная лесозаготовительная система представляет собой совокупность взаимодействующих и самостоятельно функционирующих подсистем, предназначенных для достижения конкретной цели. При планировании мероприятий, повышающих надежность и работоспособность таких систем, как харвестер, следует исходить из инновационных мероприятий, стратегий технического обслуживания и особенностей ремонта.

## Список литературы

- [1] Шиловский В.Н., Питухин А.В., Костюкевич В.М. Организация технического обслуживания зарубежной лесозаготовительной техники // *Resources and Technology*, 2013. Т. 10. № 2. С. 139–150.
- [2] Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е. Использование методов теории управления качеством для повышения эффективности работы транспортно-технологических комплексов на заготовке древесины // *Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. науч.-техн. конф.*, Тюмень, 22 октября 2020 года / ред. Н.С. Захаров. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального университета, 2020. С. 130–133.
- [3] Korane K.J. Forest machines tread lightly // *Machine Design*, 1997, v. 69, no. 17, pp. 58–61.
- [4] Рудов С.Е., Григорьев И.В. Пути повышения эффективности работы систем машин для сортиментной заготовки древесины // *Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы VII Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием*, Петрозаводск, 25 мая 2021 года. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского государственного университета, 2021. С. 168–169.
- [5] Григорьев И.В., Рудов С.Е. Перспективы создания транспортных средств для лесозаготовительного производства в арктической зоне // *Лесозаготовка и комплексное использование древесины: сб. статей Всерос. науч.-практ. конф.*, Красноярск, 10 марта 2021 года. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2021. С. 70–74.
- [6] Григорьева О.И., Давтян А.Б., Гринько О.И., Войнаш С.А. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров // *Машиностроение: новые концепции и технологии: Всерос. науч.-практ. конф.*, Красноярск, 23 октября 2020 года. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2020. С. 45–49.
- [7] Gerasimov Y., Karjalainen T., Senko S. Nordic forest energy solutions in the Republic of Karelia // *Forests*, 2013, v. 4, no. 4, pp. 945–967. DOI 10.3390/f4040945
- [8] Питухин А.В. Повреждаемость лесозаготовительных машин в условиях эксплуатации // *Инженерный вестник Дона*, 2018. № 4(51). С. 162.
- [9] Shabaev A., Urban A., Pyatin D., Sokolov A. Optimal planning of wood harvesting and timber supply in Russian conditions // *Forests*, 2020, v. 11, no. 6, pp. 1–16. DOI 10.3390/f11060662
- [10] Григорьев И.В. Сервисные контракты для современных лесных машин // *Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы V Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием*, Петрозаводск, 22 мая 2019 года. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского государственного университета, 2019. С. 26–28.
- [11] Куницкая О.А., Чернуцкий Н.А., Дербин М.В. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии. Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 192 с.
- [12] Мохирев А.П., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Войнаш С.А. Совершенствование конструкции полноповоротных лесозаготовительных машин на экскаваторных базах // *Строительные и дорожные машины*, 2018. № 6. С. 43–49.
- [13] Мохирев А.П., Мамматов В.О., Уразаев А.П. Моделирование технологического процесса работы лесозаготовительных машин // *Международные научные исследования*, 2015. № 3(24). С. 72–74.
- [14] Javůrek P., Dvořák J. Evaluation of total time consumption in harvester technology deployment in conditions of the forest sector of the Czech Republic // *J. of Forest Science*, 2018, v. 64, no. 1, pp. 33–42. DOI 10.17221/92/2017-JFS
- [15] Григорьев И.В., Рудов С.Е. Особенности эксплуатации колесных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // *Forest Engineering: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием*, Якутск, 30–31 мая 2018 года. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2018. С. 67–71.

- [16] Григорьев И.В. Калибровка харвестерных головок // Наука и инновации: векторы развития: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: сб. науч. статей: в 2 кн., Барнаул, 24–25 октября 2018 г. Барнаул: Изд-во Алтайского государственного аграрного университета, 2018. С. 78–82.
- [17] Питухин А.В., Кильпелайнен С.А. Повреждаемость лесозаготовительных машин при изготовлении // Инженерный вестник Дона, 2019. № 1(52). С. 67.
- [18] Smith J. Managing equipment health // Plant Engineering, 2001, v. 55, no. 8, pp. 30–34.
- [19] Gerasimov Y., Sokolov A., Syunev V. Development trends and future prospects of cut-to-length machinery // Advanced Materials Research, 2013, v. 705, pp. 468–473. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.705.468
- [20] Григорьев И.В., Куницкая О.А., Фам Н.Л. Применение мобильных технологий для мониторинга, контроля и управления процессами сервиса лесных машин // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 04–05 июня 2020 года / ред. Ю.А. Безруких, Е.В. Мельникова. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2020. С. 143–146.
- [21] Кобзов Д.Ю., Ереско С.П. О критериях работоспособности и надежности гидроцилиндров // Системы. Методы. Технологии, 2012. № 1(13). С. 38–45.
- [22] Григорьев И.В. Особенности эксплуатации лесных машин в сильные морозы // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 25–26 октября 2018 г. / ред. И.С. Сазонов. Могилев: Изд-во Белорусско-Российского университета, 2018. С. 102.
- [23] Григорьева О.И., Григорьев И.В. Повышение эффективности кадрового обеспечения лесного комплекса Российской Федерации // Архитектура университетского образования: построение единого пространства знаний: сб. тр. IV Нац. науч.-метод. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 30 января – 01 февраля 2020 г. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского государственного экономического университета, 2020. С. 123–130.
- [24] Пилюшина Г.А., Прусс Б.Н. Анализ причин отказов лесозаготовительной техники // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2007. № 18. С. 34–38.
- [25] Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Обслуживание цепных пильных гарнитур лесозаготовительных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2020. № 8. С. 14–19. DOI 10.31044/1684-2561-2020-0-8-14-19

## Сведения об авторах

**Мохирев Александр Петрович**✉ — д-р техн. наук, профессор кафедры автомобильных дорог и городских сооружений, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ale-mokhirev@yandex.ru

**Куницкая Ольга Анатольевна** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Природообустройство», ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», ola.ola07@mail.ru

**Калита Георгий Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии лесопользования и ландшафтного строительства, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», g.kalita@mail.ru

**Вернер Надежда Николаевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной механики и инженерной графики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет», wernern@mail.ru

**Швецова Виктория Викторовна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Начертательная геометрия и инженерная графика», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург, vikt.schvetzova2012@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.02.2022.

Одобрено после рецензирования 09.06.2022.

Принята к публикации 15.08.2022.

## LOGGING HARVESTER RELIABILITY ASSESSMENT

A.P. Mokhirev<sup>1</sup>✉, O.A. Kunitskaya<sup>2</sup>, G.A. Kalita<sup>3</sup>, N.N. Werner<sup>4</sup>, V.V. Shvetsova<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, 79, Svobodny pr., 660041, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University, 3, Sergelyakhskoye highway, 3 km, 677007, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

<sup>3</sup>Pacific National University, 136, Pacific st., 680035, Khabarovsk, Russia

<sup>4</sup>Saint-Petersburg State Forestry University, 5, Institutsky Lane, 194021, St. Petersburg, Russia

<sup>5</sup>Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 190005, St. Petersburg, Russia

ale-mokhirev@yandex.ru

The article calculates the reliability parameters of the logging felling-knot-cutting-bucking machine (harvester). Individual elements were evaluated in the car. The operation of the Ponsse-ERGO harvester was carried out on the territory of the Krasnoyarsk Territory. The duration of observations was 10 500 hours. During this time, each node revealed a certain number of failures and the average recovery time after node failure. Based on the results of the calculations, a probability diagram of the harvester system states and a Pareto diagram (accumulated probability of system failures) are constructed. According to calculations, it was determined that the greatest probability of failures falls on the hydraulic system of the transmission and hydraulic manipulator. These elements of the machine account for the main load during its operation. A detailed analysis of the reasons for the failure of a logging machine during its operation is presented. It was revealed that the main reasons for the failure of the hydraulic system are: violation of the tightness of the connection pipelines, increased wear of the moving elements of the assembly, contamination of the hydraulic fluid, not always satisfactory work of the service personnel. Also, the most common reason for stopping the harvester during operation is the failure of the saw headset. An increase in the harvester's performance and durability can be achieved by optimizing the operating conditions of the logging machine, and optimally selected design material that has higher technical characteristics that strengthen the part itself and the wear surface.

**Keywords:** probability of states, operability; durability, harvester

**Suggested citation:** Mokhirev A.P., Kunitskaya O.A., Kalita G.A., Werner N.N., Shvetsova V.V. *Oценка надежности лесозаготовительного комбайна* [Logging harvester reliability assessment] // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 93–101. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-93-101

## References

- [1] Shilovskiy V.N., Pitukhin A.V., Kostyukevich V.M. *Organizatsiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya zarubezhnoy lesozagotovitel'noy tekhniki* [Organization of maintenance of foreign logging equipment]. *Resources and Technology [Resources and Technology]*, 2013, v. 10, no. 2, pp. 139–150.
- [2] Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Rudov S.E. *Ispol'zovanie metodov teorii upravleniya kachestvom dlya povysheniya effektivnosti raboty transportno-tekhnologicheskikh kompleksov na zagotovke drevesiny* [Using the methods of quality management theory to improve the efficiency of transport and technological complexes for timber harvesting]. *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Transport and transport and technological systems: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]*, Tyumen, October 22, 2020. Ed. N.S. Zakharov. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2020, pp. 130–133.
- [3] Korane K.J. Forest machines tread lightly. *Machine Design*, 1997, v. 69, no. 17, pp. 58–61.
- [4] Rudov S.E., Grigor'ev I.V. *Puti povysheniya effektivnosti raboty sistem mashin dlya sortimentnoy zagotovki drevesiny* [Ways to improve the efficiency of machine systems for cut-to-length harvesting of wood]. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: mater. VII Vserossiyskoy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Improving the efficiency of the forestry complex: mater. VII All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation]*, Petrozavodsk, May 25, 2021. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2021, pp. 168–169.
- [5] Grigor'ev I.V., Rudov S.E. *Perspektivy sozdaniya transportnykh sredstv dlya lesozagotovitel'noy proizvodstva v arkticheskoy zone* [Prospects for the creation of vehicles for logging production in the Arctic zone]. *Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Forest exploitation and integrated use of wood: collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference]*, Krasnoyarsk, March 10, 2021. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetneva, 2021, pp. 70–74.
- [6] Grigor'eva O.I., Davtyan A.B., Grin'ko O.I., Voynash S.A. *Kontseptsiya universal'noy mashiny dlya vypolneniya lesokhozyaystvennykh rabot i tusheniya lesnykh pozharov* [The concept of a universal machine for performing forestry work and extinguishing forest fires]. *Mashinostroenie: novye kontseptsii i tekhnologii: sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Engineering: new concepts and technologies]*, Krasnoyarsk, October 23, 2020. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetneva, 2020, pp. 45–49.
- [7] Gerasimov Y., Karjalainen T., Senko S. Nordic forest energy solutions in the Republic of Karelia. *Forests*, 2013, v. 4, no. 4, pp. 945–967. DOI 10.3390/f4040945
- [8] Pitukhin A.V. *Povrezhdaemost' lesozagotovitel'nykh mashin v usloviyakh ekspluatatsii* [Damageability of logging machines under operating conditions]. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, 2018, no. 4 (51), p. 162.
- [9] Shabaev A., Urban A., Pyatin D., Sokolov A. Optimal planning of wood harvesting and timber supply in Russian conditions. *Forests*, 2020, v. 11, no. 6, pp. 1–16. DOI 10.3390/f11060662
- [10] Grigor'ev I.V. *Servisnye kontrakty dlya sovremennykh lesnykh mashin* [Service contracts for modern forest machines]. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy V Vserossiyskoy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Improving the efficiency of the forest complex: materials of the V All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation]*, Petrozavodsk, May 22, 2019. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2019, pp. 26–28.

- [11] Kunitskaya O.A., Chernutskiy N.A., Derbin M.V. *Mashinnaya zagotovka drevesiny po skandinavskoy tekhnologii* [Machine harvesting of wood according to Scandinavian technology]. St. Petersburg: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy [Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions], 2019. 192 p.
- [12] Mokhirev A.P., Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'eva O.I., Voynash S.A. *Sovershenstvovanie konstruktii polnopovorotnykh lesozagotovitel'nykh mashin na ekskavatornykh bazakh* [Improving the design of full-turn logging machines on excavator bases]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines], 2018, no. 6, pp. 43–49.
- [13] Mokhirev A.P., Mamatov V.O., Urazaev A.P. *Modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa raboty lesozagotovitel'nykh mashin* [Modeling the technological process of logging machines]. *Mezhdunarodnye nauchnye issledovaniya* [International scientific research], 2015, no. 3(24), pp. 72–74.
- [14] Javůrek P., Dvořák J. Evaluation of total time consumption in harvester technology deployment in conditions of the forest sector of the Czech Republic. *J. of Forest Science*, 2018, v. 64, no. 1, pp. 33–42. DOI 10.17221/92/2017-JFS
- [15] Grigor'ev I.V., Rudov S.E. *Osobennosti ekspluatatsii kolesnykh lesnykh mashin v slozhnykh pochvenno-gruntovykh i rel'efnykh usloviyakh* [Features of the operation of wheeled forest machines in difficult soil and relief conditions]. *Forest Engineering: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Forest Engineering: materials of a scientific and practical conference with international participation], Yakutsk, May 30–31, 2018. Yakutsk: NEFU Publishing House, 2018, pp. 67–71.
- [16] Grigor'ev I.V. *Kalibrovka kharvesternykh golovok* [Calibration of harvester heads]. *Nauka i innovatsii: vektory razvitiya: mater. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh: sb. nauchnykh statey* [Science and innovations: vectors of development: mater. International Scientific and Practical Conference of Young Scientists: Sat. scientific articles], in 2 books, Barnaul, October 24–25, 2018. Barnaul: Altai State Agrarian University, 2018, pp. 78–82.
- [17] Pitukhin A.V., Kil'pelyaynen S.A. *Povrezhdaemost' lesozagotovitel'nykh mashin pri izgotovlenii* [Damageability of logging machines during manufacture]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2019, no. 1(52), pp. 67.
- [18] Smith J. Managing equipment health. *Plant Engineering*, 2001, v. 55, no. 8, pp. 30–34.
- [19] Gerasimov Y., Sokolov A., Syuney V. Development trends and future prospects of cut-to-length machinery. *Advanced Materials Research*, 2013, v. 705, pp. 468–473. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.705.468
- [20] Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Fam N.L. *Primenenie mobil'nykh tekhnologiy dlya monitoringa, kontrolya i upravleniya protsessami servisa lesnykh mashin* [The use of mobile technologies for monitoring, control and management of forest machine service processes]. *Innovatsii v khimiko-lesnom komplekse: tendentsii i perspektivy razvitiya: mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovations in the chemical-forest complex: trends and development prospects: mater. All-Russian Scientific and Practical Conference], Krasnoyarsk, June 04–05, 2020. Ed. Yu.A. Bezrukikh, E.V. Melnikov. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetneva, 2020, pp. 143–146.
- [21] Kobzov D.Yu., Eresko S.P. *O kriteriyakh rabotosposobnosti i nadezhnosti gidrotsilindrov* [On the criteria for performance and reliability of hydraulic cylinders]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2012, no. 1(13), pp. 38–45.
- [22] Grigor'ev I.V. *Osobennosti ekspluatatsii lesnykh mashin v sil'nye morozy* [Peculiarities of operation of forest machines in severe frosts]. *Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti: mater. Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh* [New materials, equipment and technologies in industry: mater. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists], Mogilev, October 25–26, 2018. Ed. I.S. Sazonov. Mogilev: Belarusian-Russian University, 2018, p. 102.
- [23] Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. *Povyshenie effektivnosti kadrovogo obespecheniya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii* [Improving the Efficiency of Staffing the Forest Complex of the Russian Federation]. *Arkhitektura universitetskogo obrazovaniya: postroenie edinogo prostranstva znaniy: sbornik trudov IV Natsional'noy nauchno-metodicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Architecture of University Education: Building a Common Space of Knowledge: Proceedings of the IV National Scientific and Methodological Conference with International Participation], St. Petersburg, January 30 – February 01, 2020. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Economics, 2020, pp. 123–130.
- [24] Pilyushina G.A., Pruss B.N. *Analiz prichin otkazov lesozagotovitel'noy tekhniki* [Analysis of the causes of failures of logging equipment]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2007, no. 18, pp. 34–38.
- [25] Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'eva O.I. *Obsluzhivanie tsepykh pil'nykh garnitur lesozagotovitel'nykh mashin* [Maintenance of chain saw sets of logging machines]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Remont. Recovery. Modernization], 2020, no. 8, pp. 14–19. DOI 10.31044/1684-2561-2020-0-8-14-19

## Authors' information

**Mokhirev Aleksandr Petrovich** ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Highways and Urban Structures of the Siberian Federal University, ale-mokhirev@yandex.ru

**Kunitskaya Ol'ga Anatol'evna** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of «Environmental Management» of the Northern (Arctic) Federal University, ola.ola07@mail.ru

**Kalita Georgiy Aleksandrovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Technology of Forest Management and Landscape Construction of the Pacific National University, g.kalita@mail.ru

**Verner Nadezhda Nikolaevna** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics of the Saint-Petersburg State Forestry University, wernern@mail.ru

**Shvetsova Viktoriya Viktorovna** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, vikt.schvetsova2012@yandex.ru

Received 01.02.2022.

Approved after review 09.06.2022.

Accepted for publication 15.08.2022.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
 The authors declare that there is no conflict of interest