

В.В. Сиваков, А.Н. Заикин

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ
ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН
В УСЛОВИЯХ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Введение. Лесозаготовительные машины работают в тяжелых условиях. Для повышения эффективности их применения необходимо осуществлять планирование производственного процесса на основе моделирования режимов работы машин с учетом большого количества факторов: времени года, типа почвы, породного состава, объемов заготовки, характеристики хлыстов, дорожной сети, условий трелевки. Немаловажным фактором достижения высокой экономической эффективности техники является оперативный мониторинг состояния узлов и агрегатов машин и своевременное выполнение необходимых корректирующих действий по поддержанию их в рабочем состоянии или ремонта.

Цель работы – проанализировать перспективные направления применения цифровых технологий для повышения эффективности лесозаготовительных машин как в области контроля рабочих процессов, так и в области контроля их технического состояния.

Материалы и методы. В статье приведены основные направления применения цифровых технологий в области влияния на показатели производительности машин конкретных условий работы, а также возможности повышения их эффективности путем применения как дистанционных методов управления машиной, так и искусственного интеллекта, берущего на себя контроль выполнения части рабочих процессов. Проанализированы ряд работ российских и иностранных исследователей, касающиеся вопросов повышения эффективности работы лесозаготовительной техники и организации контроля ее технического состояния.

Анализ. Как показал анализ литературных источников, повышение эффективности лесозаготовительных машин на основе внедрения цифровых технологий является популярным. Так, авторами [Guerra et al., 2024] было проведено исследование лесозаготовительных машин – харвестеров и форвардеров – с целью определения влияния на показатели производительности машин ряда параметров конкретных участков, например, морфологии мест-

ности, типа почвы, состояния влажной почвы и погодных условий. Для повышения эффективности работы данные о производительности машин в автоматическом режиме отправлялись в облачную систему управления парком машин (FMS), при этом интервал обработки данных варьировался от ежечасного, ежедневного, еженедельного до ежемесячного. В результате работы определена целесообразность представления набора данных в виде параметров трех блоков: машина, окружающая среда, климат.

Дальнейшее развитие систем искусственного интеллекта подразумевает создание комплекса лесозаготовительных машин, работающих автономно, без участия человека. Однако на современном этапе достаточно сложно обеспечить такую работу машин в связи с большим разнообразием рельефа местности, деревьев, почвенных и климатических условий, поэтому переходным вариантом работы можно считать возможность дистанционного управления машинами, например, на вывозке леса форвардерами [Lundbäck et al., 2024]. Так, было проведено исследование [Lundbäck et al., 2022] по моделированию автономных перевозок форвардерами с расстоянием транспортировки от 20 до 1500 м с дистанционным управлением во время погрузки и разгрузки. Установлено, что оптимальное количество операторов составляло семь, на десять экспедиторов, что снижает затраты на 7% по сравнению со стандартной вывозкой древесины. При росте расстояния транспортировки более 500 м необходимое количество телеоператоров снижается до пяти или шести, потенциальное снижение затрат достигает 15%.

Для изучения возможности удаленного управления лесозаготовительными машинами было проведено исследование [Kim Gyun-Hyung et al., 2021], заключающееся в разработке системы телеуправления лесозаготовительными машинами с использованием изображений с рабочего места оператора. Для передачи изображения с видеокамер, установленных на лесозаготовительной машине и передачи управляющих команд для управления лесозаготовительной машиной, использовался Wi-Fi с частотой 5,8 ГГц. Команды управления передавались на машину посредством беспроводного подключения шин CAN.

В результате исследований установлено, что общая задержка включала задержку беспроводной связи и время, необходимое для правильного форматирования данных для передачи по Wi-Fi. Задержка преобразования CAN в Ethernet и Ethernet в CAN для передачи данных по шине CAN и задержка, связанная с кодированием/декодированием передаваемых изображений, составили 0,213 и 119,457 мс соответственно, при беспроводной связи максимальная задержка составила 3,506 мс.

Полевые испытания, проведенные на расстоянии более 350 м на относительно ровной поверхности, показали, что оператор может дистанционно управлять всеми приводами и функциями машины. Однако применение такой системы в реальных производственных условиях, с учетом удаленного расположения и возможного ослабления сигнала деревьями, требует проведения дополнительных исследований.

Одновременно с цифровизацией работы лесозаготовительных машин большое внимание уделяется и технике, применяемой для транспортировки древесины. Например, для повышения производительности машин на вывозке леса [Bacescu et al., 2024] исследовали возможность использования стандартизированных данных SAE J1939 от лесозаготовительных машин для улучшения процесса принятия решений и обеспечения устойчивости лесохозяйственных операций, в частности, осуществлении операции трелевки трелевочными тракторами при работе на участках с большими уклонами на северо-востоке Италии в альпийских лесах. В автоматическом режиме определялись этапы работы, их продолжительность, был проведен расчет расхода топлива и созданы модели производства и расхода топлива за рабочий цикл с учетом расстояния трелевки и уклона местности. Результаты показали, что более 82% рабочих циклов были успешно идентифицированы с точностью 60–70% в определении рабочих элементов внутри циклов. Такая высокая скорость идентификации позволяет операторам машин выявлять узкие места и повышать эффективность, прогнозировать будущие эксплуатационные воздействия и затраты на основе статистического анализа, реализованного с использованием больших данных.

В настоящее время в скандинавских странах разрабатываются решения, основанные на применении на лесозаготовках одномашинной системы с применением харвардеров вместо традиционной двухмашинной системы с харвестером и форвардером [Kärhä et al., 2018; Lundqvist et al., 2022; Lundqvist et al., 2023]. Проведенная оценка возможности применения харвардеров в Швеции показала возможность снижения общих затрат на величину около 3% при условии заготовки 50% от общего объема работ. Для повышения эффективности харвардеров [Lundqvist et al., 2023] предлагается увеличение объема лесозаготовок с использованием харвардеров, а также широкая автоматизация их работы.

Автоматизация работы операторов харвестеров и форвардеров является приоритетной для повышения эффективности лесозаготовок. Так, [Szewczyk et al., 2020] проведены исследования умственной нагрузки операторов харвестеров от увеличения уклона местности для разработки оптимальных графиче-

ков их работы и отдыха. Проводились измерения активности глаз оператора при работе на уклонах 9%, 23% и 47%. Установлено, что увеличение уклона местности, на которой работает харвестер, значительно увеличивает умственную нагрузку (до 22%), что требует соответствующего графика отдыха.

Результаты исследования. Одним из направлений повышения эффективности работы оператора харвестера, снижения его утомляемости является широкое внедрение машинного зрения, позволяющее в автоматическом режиме контролировать безопасность процесса лесозаготовок, нахождение в опасных зонах [Сиваков, Заикин, 2024; Sivakov et al., 2024a], а также определять породу древесины с применением нейронных сетей, что позволяет снизить умственную нагрузку на оператора [Жук и др., 2023; Говядин и др., 2024; Svoikin et al., 2023a, b].

Важным аспектом, от которого зависит эффективность лесозаготовок, является планирование работ [Labelle, Kemmerer, 2022; Sforza et al., 2024], определяющее необходимое количество машин [Spinelli et al., 2010; Lundqvist et al., 2022; Silva et al., 2022], а также получение данных от используемых харвестеров для уточнения планов [Rukomojnikov, Sergeeva, 2024; Sergeeva et al., 2024; Silva et al., 2024].

Для эффективной работы необходимо как учитывать результаты процесса (количество сортиментов, их объем, диаметр сортиментов, породу), так и контролировать техническое состояние машин и технологического оборудования. Современные машины (харвестеры, форвардеры) оборудованы бортовой системой диагностирования с цифровой шиной данных CAN, позволяющей достаточно просто подключать дополнительные электронные системы, оборудованные датчиками.

Рассматривая бортовую систему диагностирования, необходимо отметить, что ранее для доступа к данным, хранящимся в блоке управления машины, требовалось физическое подключение диагностического сканера, подключаемого к диагностическому разъему машины. Такой способ организации работы имеет ряд недостатков, к основному из которых можно отнести низкую оперативность получения данных о состоянии машины.

Развитие компьютерных сетей, беспроводных технологий передачи данных привело к появлению интернета вещей IoT [Kolberg, Zühlke, 2015; Gavrilović, Mishra, 2021], позволяющему организовать оперативный мониторинг состояния машины (при условии установки надежного и скоростного соединения посредством беспроводных сетей передачи данных).

Поступление большого объема разнообразных данных [Ehrlich-Sommer et al., 2024] позволяет говорить о так называемых «больших данных» (Big

Data), для хранения которых необходимо использовать базы данных. Информация, передаваемая с применяемых машин (технические и производственные параметры), поступает на сервер и заносится в базу данных, обрабатывается и далее поступает к владельцу машин, где используется для планирования лесозаготовительных работ, технического обслуживания и ремонта (рис. 1). Такая информация дает возможность: определить тенденции изменения состояния контролируемого узла и принять своевременное решение по проведению его корректировки (регулировки) или ремонта, а также изменить производственные планы [Зайкин и др., 2023, 2024; Сиваков, 2024; Hernandez-Matias et al., 2023; Sivakov et al., 2024b].

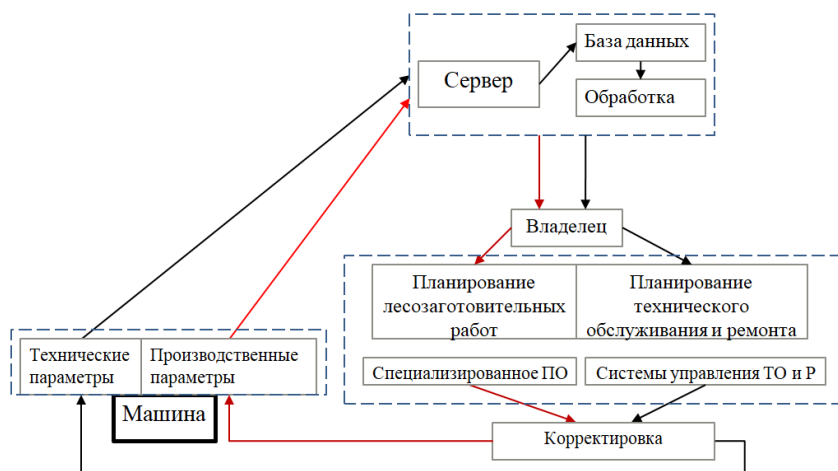


Рис. 1. Алгоритм функционирования информационной системы без модуля моделирования работ

Fig. 1. Algorithm of the information system functioning without the work modeling module

Рассматривая используемые лесозаготовительные машины, необходимо отметить, что в настоящее время в РФ применяется техника зарубежного производства (John Deere, Ponsse, Komatsu и др.), в которой используется собственное программное обеспечение [Сиваков и др., 2023]. Результаты работы харвестера хранятся в файле стандарта STM [Жук и др., 2021]. Учитывая зависимость зарубежного программного обеспечения от внешнеполитических рисков и необходимость достижения технологиче-

ского суверенитета РФ, необходимы альтернативные разработки отечественного программного обеспечения, использующего данные стандарта в качестве входных данных о работе технологического оборудования. Также необходимо передавать данные с датчиков, используемых в электронных системах машины.

Алгоритм функционирования такой информационной системы должен включать в себя специализированное программное обеспечение, позволяющее осуществлять моделирование и на его основе планирование режимов работы лесозаготовительных машин и оборудования с учетом их технического состояния и природно-производственных условий эксплуатации. Производственные (ПрД) и технические (ТехД) данные с применяемых машин (харвестеров, форвардеров, сортиментовозов и другой техники) с учетом привязки к координатам из ГИС по каналам данных поступают на сервер (в качестве сервера может выступать как сервер производителя техники, так и сервер предприятия), попадают в базу данных, обрабатываются и на основании анализа фактические результаты сравниваются с планируемыми, при необходимости производится корректировка планируемых работ (рис. 2).

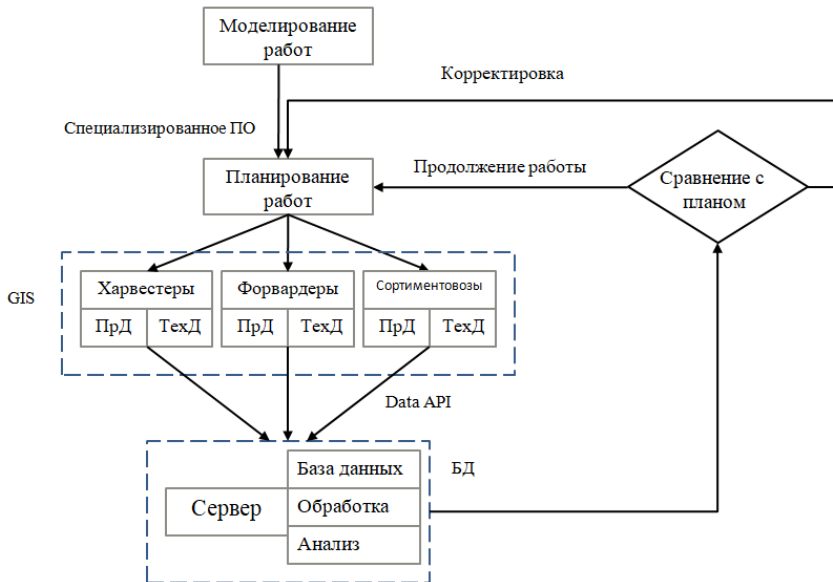


Рис. 2. Алгоритм функционирования комплексной информационной системы
Fig. 2. Algorithm of functioning of the complex information system

Работа лесозаготовительных машин достаточно сильно отличается от работы сельскохозяйственных машин ввиду удаленности лесосек от зоны покрытия сотовой сети, посредством которой осуществляется передача информации с машины на сервер компании или сервер производителя (рис. 3), поэтому при работе в условиях лесосеки и отсутствия связи с сервером целесообразно создание локальной беспроводной сети машин, работающих на лесосеке. Для этого необходима установка Wi-Fi модулей на машинах. Учитывая, что машины могут быть удалены друг от друга на достаточно большие расстояния, целесообразно создание базовой сети на основе отдельных модулей с автономным питанием, например, от солнечных батарей. Перемещение машин в этом случае не будет приводить к потере связи машин между собой.

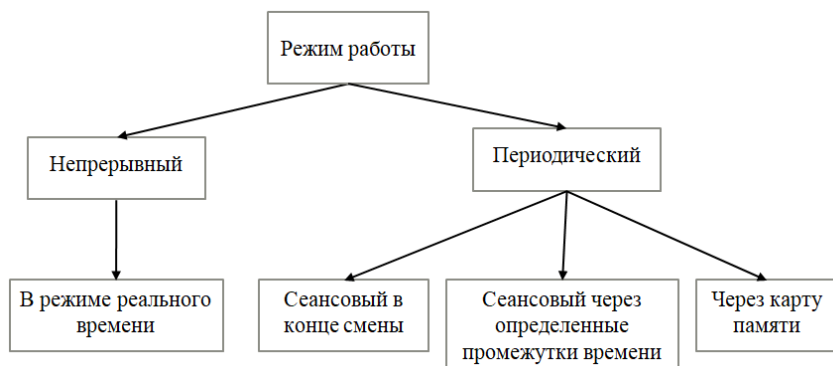


Рис. 3. Варианты организации передачи данных с лесозаготовительных машин на лесосеке

Fig. 3. Options for organizing data transfer from logging machines at the harvesting area

Передача данных на сервер может быть организована посредством установки на одну из машин комплекта спутникового интернета, позволяющего использовать его магистральный канал для передачи данных на сервер компании или производителя, а также применения БПЛА с установленным модулем ретрансляции.

Заключение. На основании проведенных исследований установлено, что вопросам цифровизации работы лесозаготовительных машин, в том числе моделированию особенностей их применения [Proto et al., 2020; Spelandio et al., 2023], а также управлению сервисным обслуживанием лесоза-

готовительных машин уделяется большое внимание. Исследуются технологии удаленного управления машинами, анализа эффективности их деятельности, а также возможности применения алгоритмов искусственного интеллекта для снижения нагрузки на оператора машин [Thaker, 2024]. Функционирование информационных систем, применяемых на лесозаготовительных машинах, без модуля моделирования режимов их работы является недостаточным. В современных условиях при моделировании и, на его основе, планировании режимов работы машин недостаточно учитывать только природно-производственные условия, необходимо также учитывать техническое состояние машин. Для этого требуется осуществлять постоянный мониторинг технического состояния узлов и агрегатов машин и оперативно передавать полученную информацию на сервер предприятия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Говядин И.К., Чубинский А.Н., Алексеев А.С. Метод измерения диаметров деревьев на основе технологий искусственного интеллекта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194.

Жук К.Д., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В. Статистическая оценка размерных характеристик лесоматериалов с использованием данных stm-файлов многооперационных лесных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. № 235. С. 137–149. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.137-149.

Жук К.Д., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В. Распознавание пород деревьев в процессе лесозаготовки с применением методов машинного обучения // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 242. С. 167–178. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.242.167-178.

Заикин А.Н., Сиваков В.В., Новикова Т.П., Зеликов В.А., Стасюк В.В., Чуйков А.С. Программное обеспечение для управления системой технического обслуживания и ремонта лесных машин: оценка применимости // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 2(50). С. 105–127. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6.

Заикин А.Н., Сиваков В.В., Зеликов В.А., Чуйков А.С., Новиков А.И., Стасюк В.В. Автоматизированное оперативное управление лесосечными работами: методологический анализ // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14, № 2(54). С. 204–226. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/12.

Сиваков В.В. Цифровизация управления системой технического обслуживания и ремонта лесозаготовительной техники // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 1. С. 64–71. DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-64-71.

Сиваков В.В., Заикин А.Н., Новикова Т.П., Зеликов В.А., Стасюк В.В., Чуйков А.С. Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных

машин: оценка эффективности на примере «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 3(51). С. 200–218. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14.

Сиваков В.В., Заикин А.Н. Повышение эффективности обучения сотрудников предприятий лесного комплекса в условиях цифровизации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 248. С. 243–256. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.243-256.

Bacescu N., Piol O., Talbot B., Marchi L., Grigolato S. Modelling skidding extraction in mountainous forest through engine data acquisition and analysis (preprint). 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4613216/v1.

Ehrlich-Sommer F., Hoenigsberger F., Gollob C., Nothdurft A., Stampfer K., Holzinger A. Sensors for Digital Transformation in Smart Forestry // Sensors. 2024. Vol. 24. Art. no. 798. DOI: 10.3390/s24030798.

Gavrilović N., Mishra A. Software architecture of the internet of things (IoT) for smart city, healthcare and agriculture: analysis and improvement directions // J. Ambient Intell Human Comput. 2021. No. 12. P. 1315–1336. DOI: 10.1007/s12652-020-02197-3.

Guerra F., Udali A., Wagner T., Marinello F., Grigolato S. Opportunity to integrate machine management data, soil, terrain and climatic variables to estimate tree harvester and forwarder performance // Annals of Forest Research. 2024. Vol. 67, no. 1. DOI: 10.15287/afr.2024.3338.

Hernandez-Matias J., Rios J., Clavijo M., Villaverde S.J., Idoipe A. Methodology and architecture for the implementation of TPM 4.0 in small and medium-sized companies // Dyna (Bilbao). 2023. Vol. 98. P. 351–355. DOI: 10.6036/10878.

Kärhä K., Poikela A., Palander T. Productivity and Costs of Harvester Systems in Industrial Roundwood Thinning // Croatian Journal of Forest Engineering. 2018. Vol. 39. P. 23–33.

Kim Gyun-Hyung, Kim Ki-Duck, Lee Hyeon-Seung, Choi Yunsung, Mun Ho-Seong, Oh Jae-Heun, Shin Beom-Soo. Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester // Journal of Biosystems Engineering. 2021. Vol. 46. P. 206–216. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.

Kolberg D., Zühlke D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies // IFAC-Papers On Line. 2015. Vol. 48, iss. 3. P. 1870–1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359.

Labelle E., Kemmerer J. Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration // Croatian journal of forest engineering. 2022. Vol. 43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.

Lundbäck M., Häggström C., Fjeld D., Lindroos O., Nordfjell T. The economic potential of semi-automated tele-extraction of roundwood in Sweden // International Journal of Forest Engineering. 2022. Vol. 33. P. 1–18. DOI: 10.1080/14942119.2022.2103784.

Lundbäck M., Lindroos O., Servin M. Rubber-Tracked Forwarders—Productivity and Cost Efficiency Potentials // Forests. 2024. Vol. 15. Art. no. 284. DOI: 10.3390/f15020284.

Lundqvist R., Rönqvist M., Flisberg P., Jönsson P., Lindroos O. Comparison of modeling approaches for evaluation of machine fleets in central Sweden forest operations // *International Journal of Forest Engineering*. 2022. Vol. 34. P. 1–12. DOI: 10.1080/14942119.2022.2102346.

Lundqvist R., Rönqvist M., Flisberg P., Jönsson P., Lindroos O. Country-wide analysis of the potential use of harwarders for final fellings in Sweden // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2023. Vol. 38. P. 1–16. DOI: 10.1080/02827581.2023.2168045.

Proto A., Sperandio G., Costa C., Maesano M., Antonucci F., Macri G., Mugnozza G., Zimbalatti G. A Three-Step Neural Network Artificial Intelligence Modeling Approach for Time, Productivity and Costs Prediction: A Case Study in Italian Forestry // *Croatian journal of forest engineering*. 2020. Vol. 41, iss. 1. DOI: 10.5552/crojfe.2020.611.

Rukomajnikov K., Sergeeva T. Simulation modeling of logging harvester movements during selective logging // *Journal of Applied Engineering Science*. 2024. Vol. 22. P. 1–8. DOI: 10.5937/jaes0-50146.

Sergeeva T., Gilyazova T., Rukomajnikov K., Tsarev E., Petuhov I., Anisimov P. Modeling of labor costs during the operation of a forest harvester // *Agrarian Scientific Journal*. 2024. Vol. 4. P. 128–135. DOI: 10.28983/asj.y2024i4pp128-135.

Sforza F., Starke M., Dietsch P., Thuer P., Lingua E., Ziesak M. Maximizing the economic benefit for cable yarding timber harvesting operations by spatially optimizing tree selection // *European Journal of Forest Research*. 2024. Vol. 144. P. 831-850. DOI: 10.1007/s10342-024-01700-1.

Silva A., Cardoso M., Gomes R., Schettini B. Minette L., Nunes Í., Villanova P. Forest extraction management with the indicator of overall efficiency of forest machines (OEFM) // *Revista Árvore*. 2022. Vol. 46, iss. 6. DOI: 10.1590/1806-908820220000018.

Sivakov V., Buglaev A., Zaikin A., Orekhovskaya A., Nurullin A., Razetdinov I. Improving the training of employees of logging enterprises in the field of labor protection // *EDP Sciences - Web of Conferences*. 2024a. Vol. 486. Art. no. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202448604007.

Sivakov V., Zaikin A., Borovaya K., Andronov A., Akhmadiev A., Sakhapov R. Improving service agricultural and forestry machinery // *BIO WEB OF CONFERENCES. IV International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure for Sustainable Development (AEGISD-IV 2024)*. Les Ulis, 2024b. Art. no. 01005.

Sperandio G., Ortenzi L., Spinelli R., Magagnotti N., Figorilli S., Acampora A., Costa C. A multi-step modelling approach to evaluate the fuel consumption, emissions, and costs in forest operations // *European Journal of Forest Research*. 2023. Vol. 143. P. 1–15. DOI: 10.1007/s10342-023-01624-2.

Spinelli R., Magagnotti N., Picchi G. Deploying Mechanized Cut-to-Length Technology in Italy: Fleet Size, Annual Usage, and Costs // *International Journal of Forest Engineering*. 2010. Vol. 21. P. 23–31. DOI: 10.1080/14942119.2010.10702595.

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov S., Bacherikov I. Stem segmentation for sustainable forest management task // E3s web of conferences. 2023a. Vol. 390. Art. no. 07038. DOI: 10.1051/e3sconf/202339007038.

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov S., Bacherikov I., Daniela V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations Using Machine-Learning Methods // Inventions. 2023b. Vol. 8, no. 2. Art. no. 57. DOI: 10.3390/inventions8020057.

Şzewczyk G., Spinelli R., Magagnotti N., Tylek P., Sowa J., Rudy P., Gaj-Gielarowiec D. The mental workload of harvester operators working in steep terrain conditions // Silva Fennica. 2020. Vol. 54, iss. 3. Art. no. 10355. DOI: 10.14214/sf.10355.

Thaker R. Advancements in Forestry Robotics: Autonomous Navigation, Sensing, and AI-Driven Applications for Precision Forestry and Forest Inventory Management // International Journal of Innovative Research and Creative Technology. 2024. Vol. 10, iss. 4. P. 1–7. DOI: 10.5281/zenodo.14001694.

References

Bacescu N., Piol O., Talbot B., Marchi L., Grigolato S. Modelling skidding extraction in mountainous forest though engine data acquisition and analysis (preprint). 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4613216/v1.

Ehrlich-Sommer F., Hoenigsberger F., Gollob C., Nothdurft A., Stampfer K., Holzinger A. Sensors for Digital Transformation in Smart Forestry. *Sensors*, 2024, vol. 24, art. no. 798. DOI: [10.3390/s24030798](https://doi.org/10.3390/s24030798).

Gavrilović N., Mishra A. Software architecture of the internet of things (IoT) for smart city, healthcare and agriculture: analysis and improvement directions. *J. Ambient Intell Human Comput.*, 2021, no. 12, pp. 1315–1336. DOI: 10.1007/s12652-020-02197-3.

Govyadin I.K., Chubinsky A.N., Alekseev A.S. Method for measuring tree diameters based on artificial intelligence technologies. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194. (In Russ.)

Guerra F., Udali A., Wagner T., Marinello F., Grigolato S. Opportunity to integrate machine management data, soil, terrain and climatic variables to estimate tree harvester and forwarder performance. *Annals of Forest Research*, 2024, vol. 67, no. 1. DOI: 10.15287/afr.2024.3338.

Hernandez-Matias J., Rios J., Clavijo M., Villaverde S.J., Idoipe A. Methodology and architecture for the implementation of TPM 4.0 in small and medium-sized companies. *Dyna (Bilbao)*, 2023, vol. 98, pp. 351–355. DOI: 10.6036/10878.

Kärhä K., Poikela A., Palander T. Productivity and Costs of Harwarder Systems in Industrial Roundwood Thinning. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2018, vol. 39, pp. 23–33.

Kim Gyun-Hyung, Kim Ki-Duck, Lee Hyeon-Seung, Choi Yunsung, Mun Ho-Seong, Oh Jae-Heun, Shin Beom-Soo. Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*, 2021, vol. 46, pp. 206–216. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.

Kolberg D., Zühlke D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. *IFAC-Papers On Line*, 2015, vol. 48, iss. 3, pp. 1870–1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359.

Labelle E., Kemmerer J. Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*, 2022, vol. 43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.

Lundbäck M., Häggström C., Fjeld D., Lindroos O., Nordfjell T. The economic potential of semi-automated tele-extraction of roundwood in Sweden. *International Journal of Forest Engineering*, 2022, vol. 33, pp. 1–18. DOI: 10.1080/14942119.2022.2103784.

Lundbäck M., Lindroos O., Servin M. Rubber-Tracked Forwarders—Productivity and Cost Efficiency Potentials. *Forests*, 2024, vol. 15, art. no. 284. DOI: 10.3390/f15020284.

Lundqvist R., Rönqvist M., Flisberg P., Jönsson P., Lindroos O. Country-wide analysis of the potential use of harwarders for final fellings in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2023, vol. 38, pp. 1–16. DOI: 10.1080/02827581.2023.2168045.

Lundqvist R., Rönqvist M., Flisberg P., Jönsson P., Lindroos O. Comparison of modeling approaches for evaluation of machine fleets in central Sweden forest operations. *International Journal of Forest Engineering*, 2022, vol. 34, pp. 1–12. DOI: 10.1080/14942119.2022.2102346.

Proto A., Sperandio G., Costa C., Maesano M., Antonucci F., Macri G., Mugnozza G., Zimbalatti G. A Three-Step Neural Network Artificial Intelligence Modeling Approach for Time, Productivity and Costs Prediction: A Case Study in Italian Forestry. *Croatian journal of forest engineering*, 2020, vol. 41, iss. 1. DOI: 10.5552/crojfe.2020.611.

Rukomajnikov K., Sergeeva T. Simulation modeling of logging harvester movements during selective logging. *Journal of Applied Engineering Science*, 2024, vol. 22, pp. 1–8. DOI: 10.5937/jaes0-50146.

Sergeeva T., Gilyazova T., Rukomajnikov K., Tsarev E., Petuhov I., Anisimov P. Modeling of labor costs during the operation of a forest harvester. *Agrarian Scientific Journal*, 2024, vol. 4, pp. 128–135. DOI: 10.28983/asj.y2024i4pp128-135.

Sforza F., Starke M., Dietsch P., Thuer P., Lingua E., Ziesak M. Maximizing the economic benefit for cable yarding timber harvesting operations by spatially optimizing tree selection. *European Journal of Forest Research*, 2024, vol. 144, pp. 831–850. DOI: 10.1007/s10342-024-01700-1.

Silva A., Cardoso M., Gomes R., Schettini B. Minette L., Nunes Í., Villanova P. Forest extraction management with the indicator of overall efficiency of forest

machines (OEFM). *Revista Árvore*, 2022, vol. 46, iss. 6. DOI: 10.1590/1806-908820220000018.

Sivakov V.V. Digitalisation of the management system of maintenance and repair of forestry machines. *Coniferous trees of the boreal zone*, 2024, vol. 42, no. 1, pp. 64–71. DOI: 10.53374/1993-0135-2024-1-64-71. (In Russ.)

Sivakov V.V., Zaikin A.N., Novikova T.P., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S. Digitalization of the workflow management system of logging machines: efficiency assessment using the example of «Ponsse», «Komatsu», and «John Deere». *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], 2023, vol. 13, no. 3 (51), pp. 200–218. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14. (In Russ.)

Sivakov V.V., Zaikin A.N. Increasing the effectiveness of training employees of forestry enterprises in the conditions of digitization. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 248, pp. 243–256. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.243-256. (In Russ.)

Sivakov V., Buglaev A., Zaikin A., Orekhovskaya A., Nurullin A., Razetdinov I. Improving the training of employees of logging enterprises in the field of labor protection. *EDP Sciences – Web of Conferences*, 2024a, vol. 486, art. no. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202448604007.

Sivakov V., Zaikin A., Borovaya K., Andronov A., Akhmadiev A., Sakhapov R. Improving service agricultural and forestry machinery. *BIO WEB OF CONFERENCES. IV International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure for Sustainable Development (AEGISD-IV 2024)*. Les Ulis, 2024b, art. no. 01005.

Sperandio G., Ortenzi L., Spinelli R., Magagnotti N., Figorilli S., Acampora A., Costa C. A multi-step modelling approach to evaluate the fuel consumption, emissions, and costs in forest operations. *European Journal of Forest Research*, 2023, vol. 143, pp. 1–15. DOI: 10.1007/s10342-023-01624-2.

Spinelli R., Magagnotti N., Picchi G. Deploying Mechanized Cut-to-Length Technology in Italy: Fleet Size, Annual Usage, and Costs. *International Journal of Forest Engineering*, 2010, vol. 21, pp. 23–31. DOI: 10.1080/14942119.2010.10702595.

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov S., Bacherikov I. Stem segmentation for sustainable forest management task. *E3s web of conferences*, 2023a, vol. 390, art. no. 07038. DOI: 10.1051/e3sconf/202339007038.

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov S., Bacherikov I., Daniela V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations Using Machine-Learning Methods. *Inventions*, 2023b, vol. 8, no. 2, art. no. 57. DOI: 10.3390/inventions8020057.

Šzewczyk G., Spinelli R., Magagnotti N., Tylek P., Sowa J., Rudy P., Gaj-Gielarowiec D. The mental workload of harvester operators working in steep terrain conditions. *Silva Fennica*, 2020, vol. 54, iss. 3, art. no. 10355. DOI: 10.14214/sf.10355.

Thaker R. Advancements in Forestry Robotics: Autonomous Navigation, Sensing, and AI-Driven Applications for Precision Forestry and Forest Inventory Management. *International Journal of Innovative Research and Creative Technology*, 2024, vol. 10, iss. 4, pp. 1–7. DOI: 10.5281/zenodo.14001694.

Zaikin A.N., Sivakov V.V., Novikova T.P., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S. Software for managing the system of maintenance and repair of forest machines: assessment of applicability. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], 2023, vol. 13, no. 2 (50), pp. 105–127. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6. (In Russ.)

Zaikin A.N., Sivakov V.V., Zelikov V.A., Chuikov A.S., Novikov A.I., Stasyuk V.V. Automatized management of logging operations: a methodological analysis. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], 2024, vol. 14, no. 2 (54), pp. 204–226. DOI: 10.34220/issn.2222- 7962/2024.2/12. (In Russ.)

Zhuk K.D., Ugryumov S.A., Svoikin F.V. Statistical evaluation of the dimensional characteristics of timber products using data from stm-files of multioperation forest machines. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2021, iss. 235, pp. 137–149. DOI: 10.21266/2079- 4304.2021.235.137-149. (In Russ.)

Zhuk K.D., Ugryumov S.A., Svoikin F.V. Classification of tree species in the process of logging using machine learning methods. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 242, pp. 167–178. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.242.167-178. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 26.11.2024

Сиваков В.В., Заикин А.Н. Совершенствование работы лесозаготовительных машин в условиях внедрения цифровых технологий // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 320–335. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.320-335

Широкое внедрение цифровых технологий в хозяйственную деятельность человека, в том числе и на лесозаготовках, является актуальным трендом развития. При организации работы лесозаготовительных машин следует учитывать не только их технические характеристики, но и их возможность адаптации в единое цифровое пространство. Обзор отечественных и зарубежных научно-технических источников показал, что вопросам совершенствования процесса лесозаготовок уделяется большое внимание, многие исследователи считают цифровизацию работы лесозаготовительных машин одним из основных направлений деятельности. Развитие систем искусственного интеллекта подразумевает создание комплекса лесозаготовительных машин, работающих автономно, без участия человека, как при заготовке древесины, так и на ее вывозке. Однако на современном этапе развития обойтись без участия человека невозможно, поэтому рассматриваются решения, направленные на повышение

эффективности работы оператора харвестера, снижение его утомляемости путем автоматизации части выполняемых работ, в частности, внедрение машинного зрения, позволяющее в автоматическом режиме контролировать безопасность процесса лесозаготовок, нахождение в опасных зонах, определять породу древесины с применением нейронных сетей для снижения умственной нагрузки на оператора. Важным аспектом повышения эффективности лесозаготовок является планирование работ с применением информационной системы, которое как учитывает результаты работы машин (диаметр и количество сортиментов, их объем, породу), так и контролирует техническое состояние машин и технологического оборудования. Алгоритм функционирования информационной системы должен включать в себя специализированное программное обеспечение, позволяющее осуществлять моделирование и на его основе планирование режимов работы лесозаготовительных машин и оборудования с учетом их технического состояния и природно-производственных условий эксплуатации. Для учета особенностей работы лесозаготовительных машин ввиду удаленности лесосек от зоны покрытия сотовой сети предлагаются решения по передаче необходимой информации на сервер компании.

Ключевые слова: цифровизация, информационные технологии, лесозаготовки, лесозаготовительные машины, режимы работы машин.

Sivakov V.V., Zaikin A.N. Improving the operation of forestry machines under the conditions of digital technologies implementation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehneskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 320–335 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.320-335

The widespread introduction of digital technologies into human economic activities, including logging, is an actual development trend. When organizing the work of logging machines, it is necessary to take into account not only their technical characteristics, but also their ability to adapt to a single digital space. A review of domestic and foreign scientific and technical sources has shown that much attention is paid to the issues of improving the logging process, many researchers consider the digitalization of logging machine operation as one of the main activities. The development of artificial intelligence systems implies the creation of a set of logging machines that work autonomously, without human participation, both in timber harvesting and its removal. However, at the current stage of development, it is impossible to do without human participation, therefore, the considered solutions are aimed at improving the efficiency of the harvester operator, reducing his fatigue by automating some of the work performed, in particular, the introduction of machine vision, which allows automatic control of the safety of the logging process, presence in dangerous areas, determine the species of wood with the use of neural networks to reduce the mental load on the operator. An important aspect of improving the efficiency of logging is work planning with the use of an information system, which

takes into account both the results of machine operation (diameter and number of assortments, their volume, species) and controls the technical condition of machines and technological equipment. The algorithm of the information system functioning should include specialized software that allows modeling and on its basis planning of operation modes of logging machines and equipment taking into account their technical condition and natural-production operating conditions. Solutions to transfer the necessary information to the company's server to take into account the peculiarities of logging machines operation due to the remoteness of harvesting areas from the cellular network coverage area are proposed in the paper.

Key words: digitalization, information technology, logging, logging machines, machine operation modes.

СИВАКОВ Владимир Викторович – доцент кафедры транспортно-технологических машин и сервиса Брянского государственного инженерно-технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 1350-3778. ORCID: 0000-0002-0175-9030.

241037, пр. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия. E-mail: sv@bgitu.ru

SIVAKOV Vladimir V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Engineering-technological University. SPIN-code: 1350-3778. ORCID: 0000-0002-0175-9030.

241037. Stanke Dimitrov av. 3. Bryansk. Russia. E-mail: sv@bgitu.ru

ЗАЙКИН Анатолий Николаевич – профессор кафедры транспортно-технологических машин и сервиса Брянского государственного инженерно-технологического университета, доктор технических наук. SPIN-код: 2009-4260. ORCID: 0000-0002-1831-6893.

241037, пр. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия. E-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru

ZAIKIN Anatoly N. – DSc (Technical), Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Engineering-technological University. SPIN-code: 2009-4260. ORCID: 0000-0002-1831-6893.

241037. Stanke Dimitrov av. 3. Bryansk. Russia. E-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru