

Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14>

УДК 631.356.46



Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere»

Владимир В. Сиваков¹, sv@bgitu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Анатолий Н. Заикин¹, zaikin.anatolij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

Татьяна П. Новикова², novikova_tp.vglta@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Владимир А. Зеликов²✉, zelikov-vrn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Владимир В. Стасюк²✉, stasiuk.volodya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8689-955X>

Алексей С. Чуйков³, offlex88@belstu.by, <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

¹ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, 241037, Россия

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

³Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

При организации работы лесосозаготовительных машин следует учитывать не только их технические характеристики, но и адаптацию в единое цифровое пространство. При отсутствии синхронизации снижается возможность контролировать объемы заготовленной древесины, оптимизировать сортиментные планы для получения максимальной выгоды, осуществлять удаленный мониторинг технического состояния машин, организовывать их эффективное техническое обслуживание и ремонт. Программное обеспечение, используемое производителями лесозаготовительной техники «Ponsse», «Komatsu», «John Deere», оценивали по четырнадцати критериям контроля параметров, управления техническим обслуживанием машин, обучения персонала с помощью метода межгрупповых связей (мера Жаккара), и визуализировали кластерной диаграммой. Основой цифровых систем является программные решения, позволяющие интегрировать в единое информационное пространство компании машины только одного бренда, что сужает поле их деятельности, а следовательно, снижает эффективность их применения. В существующих моделях цифровых экосистем рассмотренных компаний не хватает модуля, связанного с планированием лесозаготовок, что не позволяет эффективно увязать потребное количество техники (харвестеров, форвардеров, погрузчиков, трелевщиков) с планируемыми объемами заготовки древесины, а также согласовать их работу и производительность с техническим обслуживанием и ремонтом. Несбалансированность объемов выработки разными машинами, применяемыми на лесозаготовках, ведет к простоям наиболее производительных (головных) машин и снижению общего объема их выработки до минимального на одной из основных операций.

Ключевые слова: программное обеспечение, «Ponsse», «Komatsu», «John Deere», лесной комплекс, лесовосстановительные работы, лесозаготовки, информационное пространство.

Финансирование: исследование проведено при поддержке локального гранта ФГБОУ ВО ВГЛТУ.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» / В. В. Сиваков, А. Н. Заикин, Т. П. Новикова, В. А. Зеликов, В. В. Стасюк, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 200–218. – Библиогр.: с. 211–217 (50 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14>.


Поступила 02.10.2023. *Пересмотрена* 03.11.2023. *Принята* 13.11.2023. *Опубликована онлайн* 30.11.2023.

Review



Digitalization of the workflow management system of logging machines: efficiency assessment using the example of «Ponsse», «Komatsu», and «John Deere»

Vladimir V. Sivakov¹, sv@bgitu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Anatolii N. Zaikin¹, zaikin.anatolij@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

Tatyana P. Novikova², novikova_tp.vglta@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Vladimir A. Zelikov² , zelikov-vrn@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Vladimir V. Stasyuk² , stasiuk.volodya@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8689-955X>

Alexey S. Chuikov³, offlex88@belstu.by,  <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

¹ Bryansk State Technological University of Engineering, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation

² Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva street, Voronezh, 394087, Russian Federation

³ Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus

Abstract

When organizing the work of logging machines, it is necessary to take into account not only their technical characteristics, but also their adaptation into a single digital space. In the absence of synchronization, the ability to control the volume of harvested wood, optimize sorting plans for maximum benefit, remotely monitor the technical condition of the tires, organize their effective maintenance and repair is reduced. The software used by the manufacturers of logging equipment "Ponsse", "Komatsu", "John Deere" was evaluated according to fourteen criteria for parameter control, machine maintenance management, personnel training using the method of intergroup relations (Jacquard measure), and visualized with a cluster diagram. The basis of digital systems is software solutions that allow integrating machines of only one brand into a single information space of the company, which narrows the field of their activity, and therefore reduces the effectiveness of their application. The existing models of digital ecosystems of the companies under consideration lack a module related to logging planning, which does not allow to effectively link the required amount of equipment (harvesters, forwarders, loaders, skidders) with the planned volumes of timber harvesting, as well as to coordinate their work and productivity with maintenance and repair. The imbalance of output volumes by different machines used in logging leads to downtime of the most productive (head) machines and a decrease in the total volume of their output to a minimum at one of the main operations.

Keywords: *software, "Ponsse", "Komatsu", "John Deere", forest complex, reforestation, logging, information space.*

Funding: the study was conducted with the support of a VSUFT local grant.

Acknowledgments: software, forest complex, reforestation, logging, information space.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Sivakov V. V., Zaikin A. N., Novikova T. P., Zelikov V. A., Stasyuk V. V., Chuikov A. S. (2023). 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], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 200-218 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14>.

Received 02.10.2023. **Revised** 03.11.2023. **Accepted** 13.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

Введение

Широкое внедрение цифровых технологий [1] во все сферы хозяйственной деятельности является одним из основных трендов последнего времени [2], их основой является применение интернета вещей [3] и цифровых двойников изделий и процессов [4, 5, 6]. В России также наметился устойчивый тренд на внедрение цифровых технологий в разных областях, в том числе и в лесном комплексе [7]. При выборе машин для лесозаготовок [8, 9] (харвестеров, форвардеров, погрузчиков, сортиментовозов и других лесозаготовительных машин) важно учитывать не только их технические характеристики [38], но и то, насколько быстро и эффективно они могут быть адаптированы в единое цифровое пространство, позволяющее осуществлять планирование лесозаготовительных [10, 11] и лесовосстановительных [37,39] работ, удаленный контроль технического состояния узлов и агрегатов [12, 13] лесозаготовительных машин, их объемы выработки [14, 15], а также управление техническим обслуживанием и ремонтом [16,40] лесозаготовительных машин, включая распределение работ между персоналом [31;32;43] и логистику запасных частей [50].

В основе цифровизации харвестеров, форвардеров, скиддеров, сортиментовозов [48] и других лесозаготовительных машин как технических систем [35,42,44] лежит электронная компонентная база [33-36] и средства ее разработки [45-47]. Программное обеспечение в этой области активно развивается, появляется большое количество информационных систем [17, 18, 41], позволяющих интегрировать все данные в единое цифровое пространство. Основой цифровизации являются цифровые карты [19, 20]. Использование сложных лесных машин привело к необходимости повышения эффективности обучения операторов путем примене-

ния электронных тренажеров [21], технологий дополненной и виртуальной реальностей [22], электронных симуляторов [23]. Программное обеспечение в области лесного хозяйства и лесозаготовок разрабатывается как коммерческими компаниями, так и вузовскими коллективами [24].

Рассмотрим вопросы цифровизации системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин на примере основных производителей лесозаготовительной техники, таких, как «Ponsse», «Komatsu», «John Deere» [24].

В качестве цели исследований установлена оценка применимости программного обеспечения для цифровизации лесозаготовительных машин трех указанных производителей по критериям эффективности обеспечения единого цифрового пространства.

Материалы и методы

Объект исследования

Коммерческое программное обеспечение, применяемое ведущими зарубежными производителями лесозаготовительной техники «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere».

Сбор данных

Сбор данных основан на систематическом поиске по базам данных ELibrary.ru и открытым ресурсам сети интернет (например, LENS, Google Scholar) при следующем дескрипторе запроса: {информационные системы производителей лесозаготовительной техники}. Диапазон поиска – 2013-2023 годы.

Анализ данных

По аналогии с ранее проведенными исследованиями, «из систематического поиска были отобраны наиболее часто применяемые программные продукты и оценена в программном обеспечении для статистических вычислений SPSS Statistics v25 степень их сходства и различия [7,18]» по следую-

щим бинарным (0 – отсутствие; 1 – наличие) критериям: возможности управления лесозаготовительной техникой, возможности использования цифровых карт, возможностью мониторинга параметров лесозаготовительных машин, возможностью контроля парка машин, возможностью управления техническим обслуживанием, возможностью удаленного доступа, мониторинга лесозаготовок, планирования лесозаготовок, возможностью управления со смартфона и возможностью обучения персонала (симуляторов).

Визуализацию оценочных данных, согласно А.Н. Заикину и соавторам (2023), осуществляли

кластерной [49] «диаграммой (рис. 1), по оси абсцисс которой откладывали меру Жаккара (Jaccard) для бинарных данных, вычисленную по методу межгрупповой связи, а по оси ординат – критерии оценки [18]».

Результаты

Сравнительные характеристики цифровых сервисов производителей лесозаготовительной техники «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики цифровых сервисов техники «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere»

Table 1

Comparative characteristics of digital services of the «Ponsse», «Komatsu» and «John Deere» logging equipment

| Наименование Name | «Ponsse» | «Komatsu» | «John Deere» |
|--|----------|-----------|--------------|
| Управление техникой Equipment management: | | | |
| - харвестеры - harvesters | 1 | 1 | 1 |
| - форвардеры - forwarders | 1 | 1 | 1 |
| - другая техника - other equipment | 0 | 0 | 1 |
| Цифровые карты + GIS Digital maps + GIS | 1 | 1 | 1 |
| Мониторинг параметров машин Monitoring of machine parameters | 1 | 0 | 1 |
| Контроль парка машин Fleet control | 1 | 1 | 1 |
| Управление техническим обслуживанием Maintenance management | | | |
| - харвестеры - harvesters | 1 | 1 | 1 |
| - форвардеры - forwarders | 1 | 1 | 1 |
| - другая техника - other equipment | 0 | 0 | 1 |
| Удаленный доступ Remote access | 1 | 0 | 1 |
| Мониторинг лесозаготовок Logging monitoring | 1 | 0 | 0 |
| Планирование лесозаготовок Logging planning | 0 | 0 | 0 |
| Мобильная версия Mobile version | 1 | 0 | 1 |
| Обучающие симуляторы Educational simulators | 0 | 0 | 1 |

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Кластерная диаграмм, построенная на основании табл. 1, представлена на рис. 1.

Основой цифровой системы «Ponsse» (рис. 2) является программное решение Ponsse Manager, позволяющее интегрировать в единое информационное пространство компании машины бренда и управлять всем парком для достижения наилучших финансовых показателей.

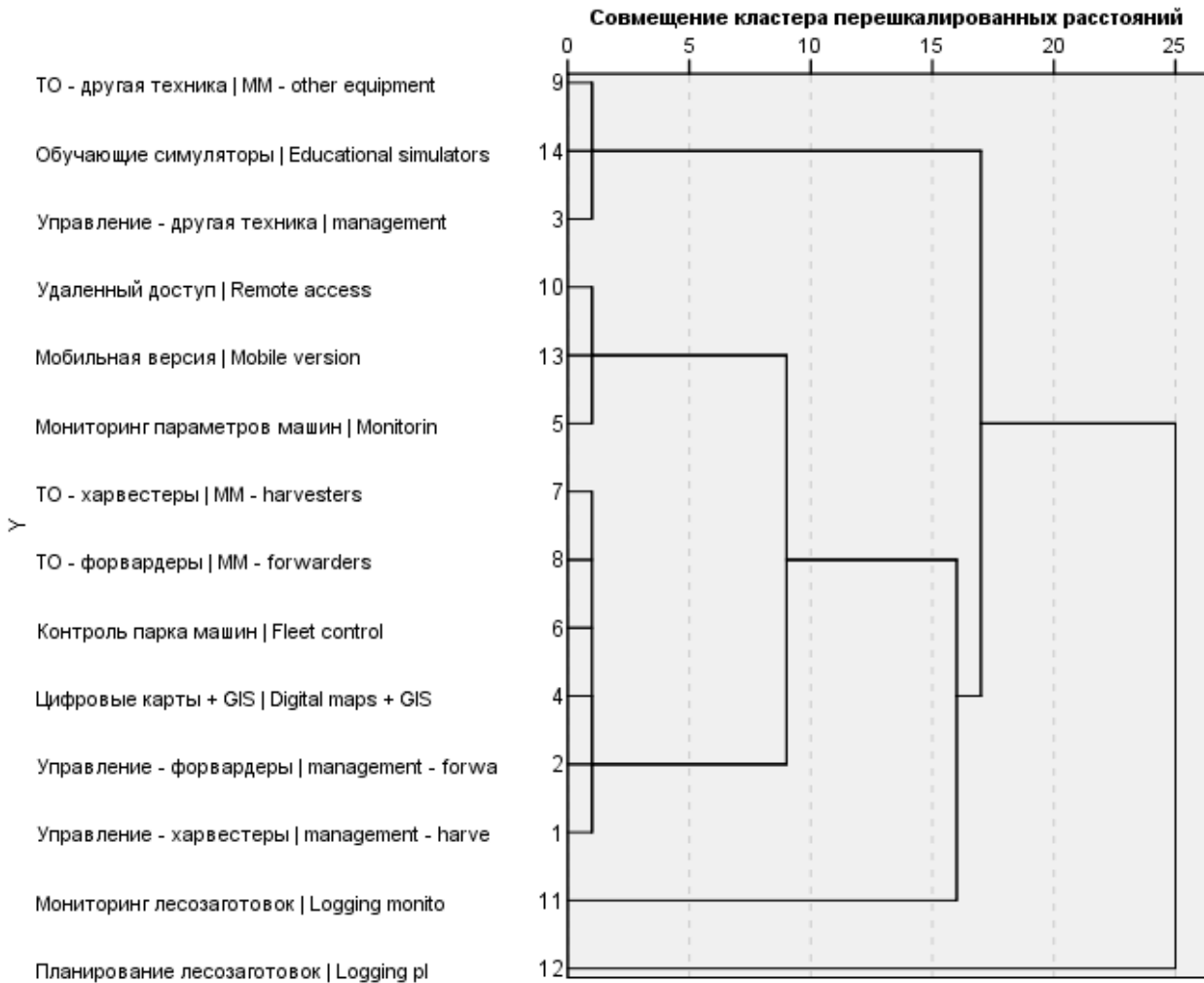
С целью осуществления процесса планиро-

вания и контроля лесозаготовок компанией разработан ряд продуктов линейки Opti, позволяющего планировать проведение лесозаготовок, отправлять карты местности на лесозаготовительную машину, оценивать количество заготовленной древесины, в том числе по регионам.

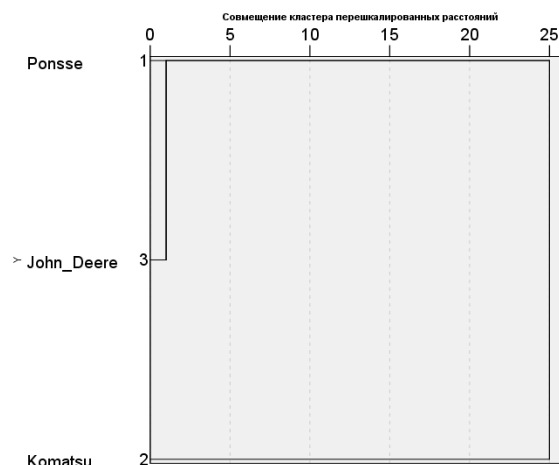
Управление работой лесозаготовительной техники осуществляется специальным программным обеспечением:

- Opti 5G (харвестеры);
- Opti Control, Opti Eco Drive (форвардеры);

- Opti 7 PC (лесозаготовительные машины на гусеничном ходу).



a | a



б | b

Рисунок 1. Кластерная диаграмма сходства и различия для оценки применимости цифровых сервисов лесозаготовительной техники «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» по критериям эффективности (а) и производителю (б)

Figure 1. Diagram of similarities and differences for assessing the applicability of «Ponsse», «Komatsu», and «John Deere» logging machinery according to the performance criteria (a) and the manufacturer (b)

Источник: собственные результаты авторов
Source: own results

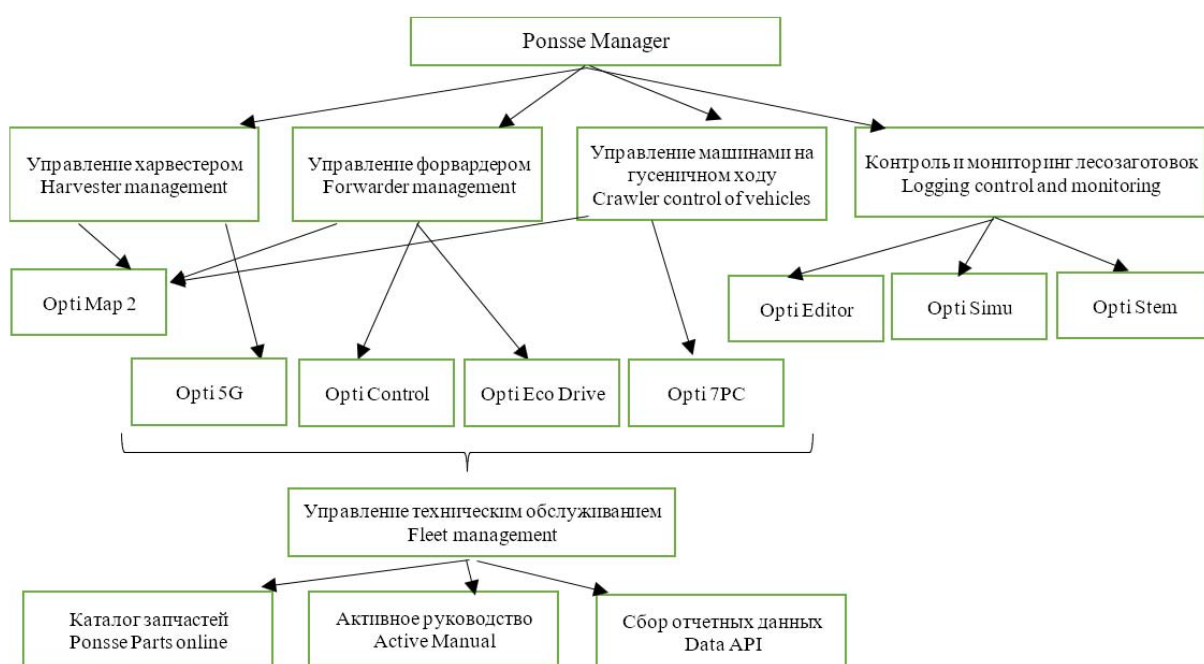


Рисунок 2. Программное обеспечение для управления парком машин PONSSE

Figure 2. PONSSE fleet management

Источник: Собственная схема авторов

Source: Authors' own scheme

Все системы используют цифровые карты Opti Map 2. Основой для объединения всех указанных систем является программа PONSSE Manager, контролирующая все операции компании, парк рабочих машин с целью роста эффективности планирования работ по поддержанию технического состояния и отчетности по фактически отработанному времени. Программой можно пользоваться на смартфоне или планшете.

Цифровизация управления техническим обслуживанием и ремонтом машин осуществляется на основе программы Fleet Management (рис. 3).

PONSSE Active Manual (рис. 4) обеспечивает доступ к активному руководству по использованию машинами, правильным приемам технического обслуживания, позволяя получение нужной информации в любое время.

PONSSE Parts Online (рис. 5) дает возможность получать информацию о ценах и наличии запчастей круглосуточно в режиме реального времени, является частью сервиса PONSSE Manager, доступен по адресу <https://ponssemanager.com>.

PONSSE Data API является инновационным интерфейсом, который предоставляет актуальные и точные данные о парке лесной техники для целей отчетности, контроля и планирования ресурсов. Данные, собранные с отдельных лесных машин, обрабатываются в облачной среде и далее предоставляются ИТ-системам заказчика. На основе этих данных создаются различные отчеты, позволяющие эффективно планировать ресурсы и соответствующим образом планировать предстоящую работу, что позволяет значительно повысить эффективность работы [25].

Цифровой основой программного обеспечения управления машинами компании «Komatsu» (рис. 6) служит программный продукт MaxiExplorer (рис. 7), представляющий собой комплексную систему управления машиной, агрегатом, процессом раскрывки, установками манипулятора, имеет ряд функций административного назначения, обеспечивающих контроль над цепочкой логистических и производственных процессов.

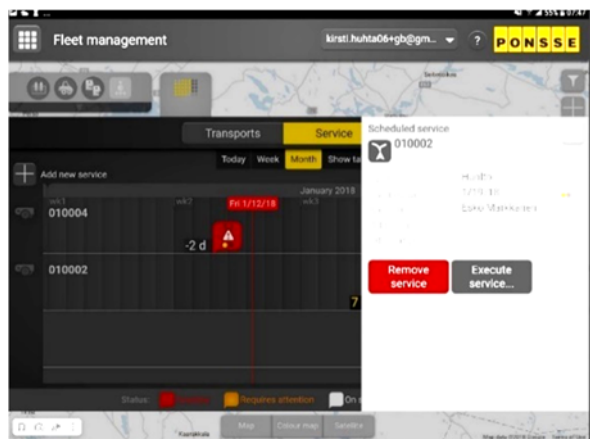


Рисунок 3. Интерфейс программы Fleet Management
 Источник: Собственная схема авторов
 Figure 2. Fleet Management Program Interface
 Source: Authors' own scheme

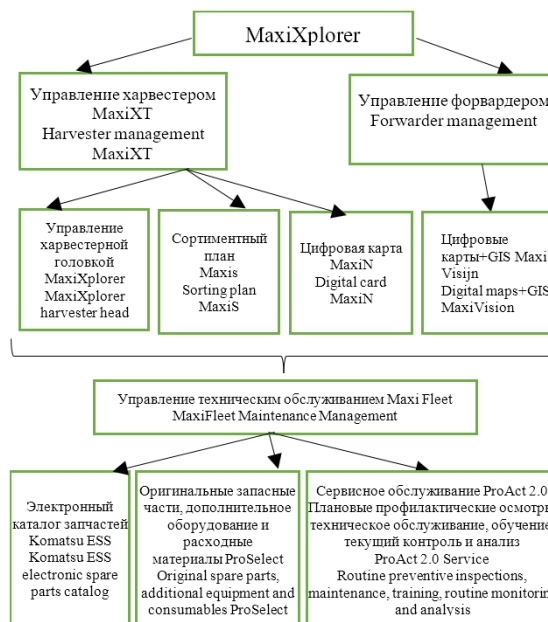


Рисунок 6. Управление парком машин Komatsu
 Источник: Собственная схема авторов
 Figure 6. Komatsu Fleet Management
 Source: Authors' own scheme

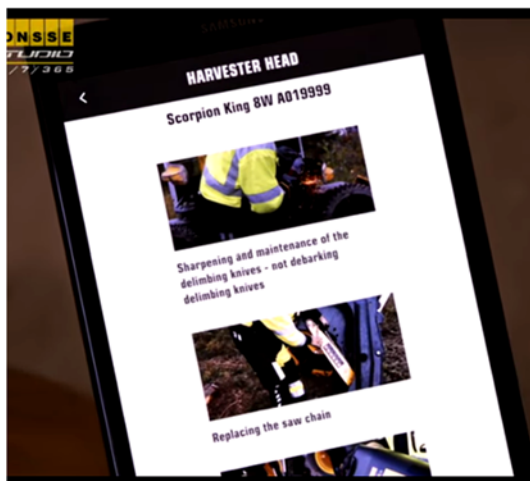


Рисунок 4. Интерфейс Active Manual
 Источник: Собственная схема авторов
 Figure 4. Active Manual Interface
 Source: Authors' own scheme

| Crane calibration | Calibration crane sensor | Crane slewing | Crane out/in | General |
|--------------------------------|--------------------------|---------------|--------------|---------|
| 60 10 | 60 15 | 45 0 | 0 90 | 330 |
| 60 10 | 60 15 | 45 0 | 0 90 | 330 |
| 75 8 | 75 20 | 25 0 | 0 90 | 330 |
| 55 8 | 55 20 | 25 0 | 0 90 | 330 |
| 60 8 | 60 20 | 25 0 | 0 90 | 330 |
| 60 8 | 60 20 | 25 0 | 0 90 | 330 |
| 60 8 | 60 20 | 25 0 | 0 90 | 330 |
| 60 8 | 60 20 | 25 0 | 0 90 | 330 |
| 70 10 | 20 0 | 0 0 | 90 410 | |
| 70 10 | 20 0 | 0 0 | 90 410 | 325 |
| Quick setting, crane speed (%) | | | | |
| 100 | | | | |

Рисунок 7. Интерфейс программы MaxiXplorer
 Источник: Собственная схема авторов
 Figure 7. MaxiXplorer program interface
 Source: Authors' own scheme

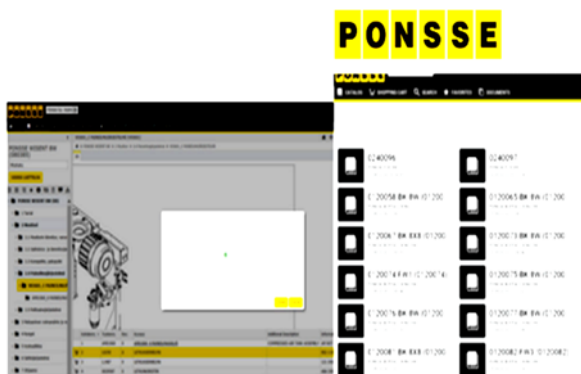


Рисунок 5. Интерфейс Parts Online
 Источник: Собственная схема авторов
 Figure 5. Parts Online Interface
 Source: Authors' own scheme

Система управления харвестером MaxiXT (рис. 8) позволяет управлять всеми процессами, начиная от управления двигателем и манипулятором до управления системой выравнивания кабины, трансмиссией и опусканием/подниманием лестницы. Поддерживает неограниченное количество пользователей, а также несколько различных профилей оператора для работы в разных условиях.

Для управления харвестерной головкой используется программа MaxiXT Head (рис. 9), позволяющая эффективно выполнять операции по раскряжке и обрезке сучьев.

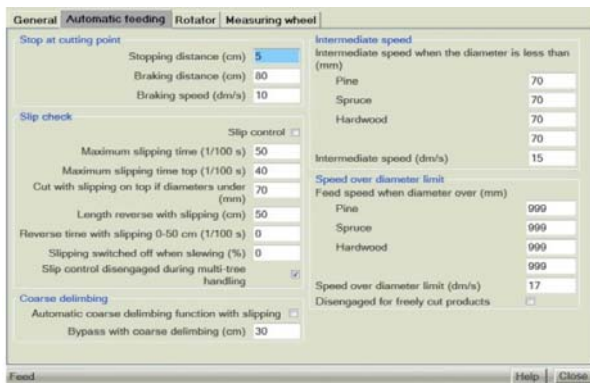


Рисунок 8. Интерфейс программы MaxixT

Источник: Собственная схема авторов

Figure 8. Maxixe program Interface

Source: Authors' own scheme

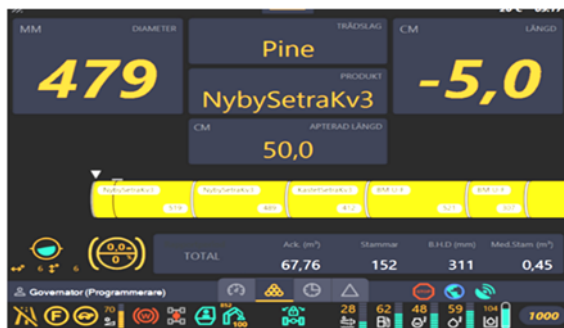


Рисунок 9. Интерфейс программы MaxixT Head

Источник: Собственная схема авторов

Figure 9. Maxixe Head program Interface

Source: Authors' own scheme

MaxiS дает возможность отображать профили стволов и распечатывать перечни-спецификации лесоматериалов.

MaxiN обрабатывает карты в машине с нанесением выработанной продукции, позволяет импортировать объект с картами и GIS-информацией, отображает маршрут и продукцию на карте, рассчитывает площади и расстояния.

Управление техническим обслуживанием осуществляется с помощью программы MaxiFleet (рис. 10), обеспечивающей дистанционное управление работой ряда систем, оказание технической поддержки оператору, в проведении инструментального сравнения и анализа эксплуатационных показателей как отдельной машины, так и всего парка.

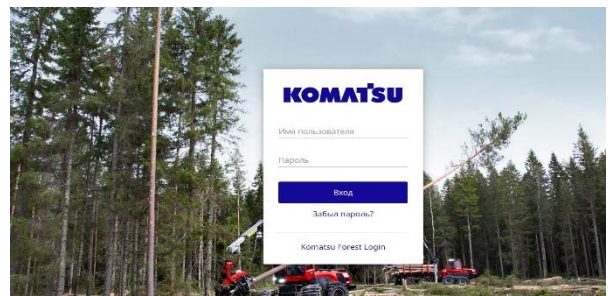


Рисунок 10. Интерфейс сайта доступа программы

Источник: Собственная схема авторов

Figure 10. Interface of the program access site

Source: Authors' own scheme

В систему включается:

- Электронный каталог запчастей ESS (рис. 11), позволяющий осуществлять поиск любых запасных частей, выводит покомпонентные схемы узлов, содержит пособия-руководства.

- ProSelect объединяет оригинальные запасные части, дополнительное оборудование и расходные материалы, которые разработаны специально для машины Komatsu в соответствии со строгими критериями качества.

- ProAct 2.0 – концепция сервиса, позволяющая получить все услуги по обслуживанию техники по твердой, низкой цене, на базе фактически отработанных моточасов.

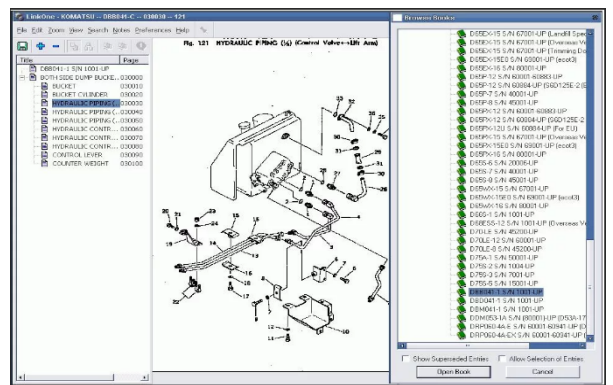


Рисунок 11. Электронный каталог запчастей ESS

Источник: Собственная схема авторов

Figure 11. Electronic catalog of ESS spare parts

Source: Authors' own scheme

Вся информация по техническому обслуживанию, осуществляемому дилерскими центрами, доступна после авторизации на сайте компании (рис. 12).

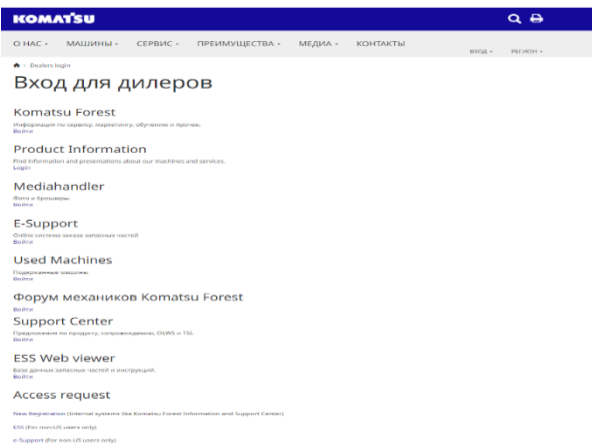


Рисунок 12. Скриншот страницы компании Komatsu для дилеров

Источник: Собственная схема авторов

Figure 12. Screenshot of the Komatsu company page for dealers

Source: Authors' own scheme

Компания John Deere разработала современные интеллектуальные системы измерения, контроля и обмена данными, применение которых дает возможность максимального использования потенциала парка лесозаготовительной техники компании. Указанные системы оборудованы современным интерфейсом, при этом их функциональные возможности направлены на достижение максимальной производительности. Программные продукты, позволяющие управлять работой техники, ее обслуживанием, представлены на рис. 13.

Для управления харвестерами и форвардерами серии E разработана система управления TimberMatic, упрощающая процесс переобучения.

Использование единого пользовательского интерфейса для управления базовой машиной, системой измерения и харвестерной головкой дает возможность настройки большинства параметров работы харвестера с рабочего места оператора (рис. 14).

На форвардерах серии E применяется система управления TimberMatic F-12 (рис. 15), осуществляющая в едином пользовательском интерфейсе управление базовой машиной и системой взвешивания, а также выводящей, при необходимости, руководство по эксплуатации системы управления с нужной информацией.

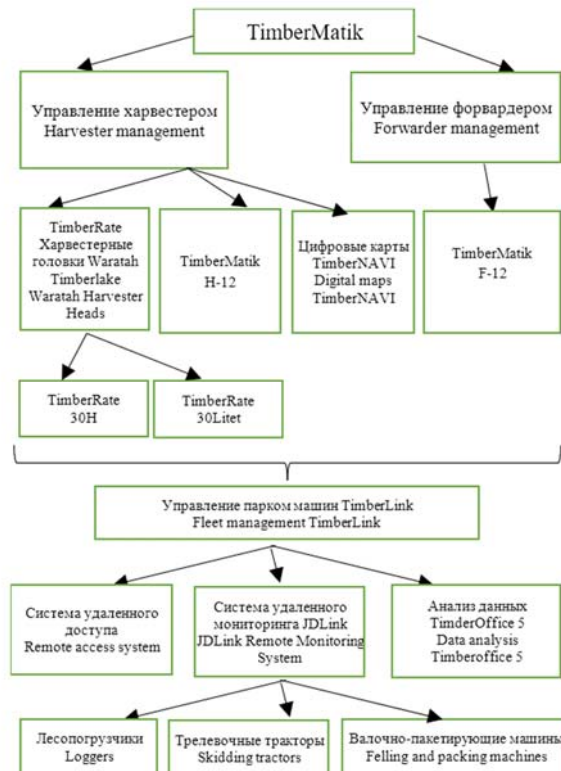


Рисунок 13. Управление парком машин John Deere

Источник: Собственная схема авторов

Figure 13. John Deere Fleet Management

Source: Authors' own scheme



Рисунок 14. Интерфейс системы управления харвестером TimberMatic H-12

Источник: Собственная схема авторов

Figure 14. Interface of the TimberMatic H-12 harvester control system

Source: Authors' own scheme

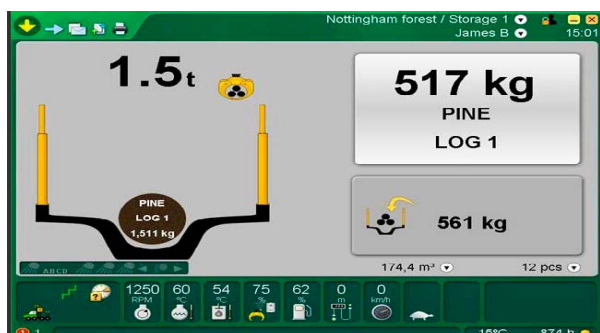


Рисунок 15. Интерфейс системы управления форвардером TimberMatic F-12

Источник: Собственная схема авторов

Figure 15. Interface of the TimberMatic F-12 forwarder control system

Source: Authors' ownscheme

Обучение работой возможно путем использования компьютерного симулятора.

Для харвестерных головок Waratah серии 200, 400, 600 используются управляющие и измерительные системы TimberRite (рис. 16), управляющие посредством интеллектуальных систем рабочей нагрузкой, доступом к информации в режиме реального времени и беспроводной передачей данных о производительности и параметрах харвестерной головки для обеспечения максимально возможной производительности. Кроме того, TimberRite предоставляет необходимую статистику по работе и ремонту. Разработаны 2 варианта TimberRite:



Рисунок 16. Интерфейс системы управления харвестерной головкой Waratah TimberRite

Источник: Собственная схема авторов

Figure 16. Interface of the Waratah TimberRite harvester head control System

Source: Authors' ownscheme

Для управления на базе персонального компьютера харвестерной/обрабатывающей головкой с функциями измерения и раскряжевки леса разработана система TimberRite 30Lite, обладающая большей функциональностью, чем 30Lite и позволяющая работать с электронной почтой, передавать данные по каналу GSM или GPRS посредством спутникового телефона или USB-носителя. Также она оптимизирует обработку стволов деревьев при раскряжевке.

Контроль всех основных функций и выполнение регулировок машин осуществляется посредством TimberLink (рис. 17), позволяющей достичь и поддерживать высокую производительность при минимизации расхода топлива, а также дающей возможность выполнения профилактического технического обслуживания.

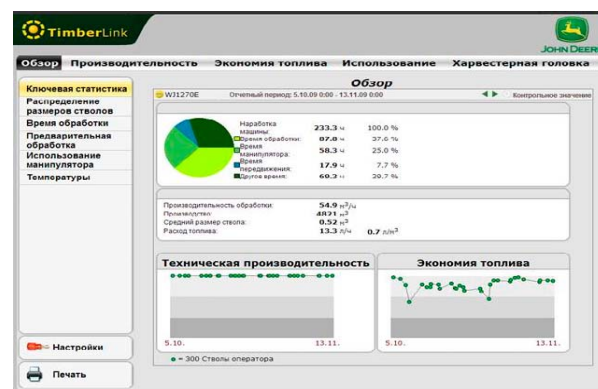


Рисунок 17. Интерфейс системы управления TimberLink

Источник: Собственная схема авторов

Figure 17. TimberLink Management System Interface

Source: Authors' own scheme

Назначение TimberLink:

- мониторинг текущей производительности и эксплуатационных характеристик машины;
- своевременный контроль технического состояния машины;
- раннее определение потенциальных неисправностей и увеличение, за счет этого, срока продуктивной эксплуатации машины и компонентов путем своевременного проведения профилактического технического обслуживания;
- определение необходимости изменения параметров машины;

- достижение топливной экономичности при эксплуатации.

Система JDLink (рис. 18) обеспечивает быструю и точную дистанционную диагностику машин марки – это харвестеры, форвардеры, трелевочные тракторы, лесопогрузчики, валочно-пакетирующие машины. Применение системы позволяет сервисной службе быстрее отреагировать на выявление неполадок.

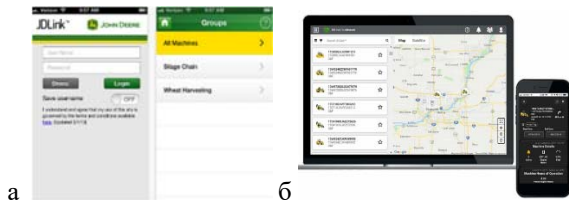


Рисунок 18. Система JDLink:

а – пример интерфейса, б – мобильная версия

Источник: Собственная схема авторов

Figure 18. JDLink System:

a is an example of the interface, b is the mobile version

Source: Authors' own scheme

Обсуждение

На основе анализа полученных сравнительных характеристик цифровых сервисов необходимо отметить, что производители лесозаготовительной техники серьезно подходят к решению вопроса повышения эффективности ее деятельности, предлагая лесозаготовительным компаниям эффективные системы управления работой и техническим обслуживанием машин.

Однако, на наш взгляд, в модели цифровой экосистемы рассмотренных компаний не хватает модуля, связанного с планированием лесозаготовок (рис.19), что не позволяет эффективно увязать требуемое количество техники (харвестеров, форвардеров, погрузчиков, трелевщиков) с планируемыми объемами заготовки древесины и последующим лесовосстановлением [37], а также согласовать их работу и производительность с техническим обслуживанием и ремонтом.

Например, при заготовке древесины с использованием харвестера предлагается использовать данные о проходимости харвестера для составления карты проходимости для форвардера, что повысит эффективность его работы [26, 27, 28].

Несбалансированность объемов выработки разными машинами, применяемыми на лесозаготовках, ведет к простоям наиболее производительных (головных) машин и снижению общего объема их выработки до минимального на одной из основных операций [9].



Рисунок 19. Модель цифровой экосистемы лесозаготовительной техники

Источник: Собственная схема авторов

Figure 19. A model of the digital ecosystem of logging equipment

Source: Authors' own scheme

Цифровизация многих отраслей промышленности позволяет повысить эффективность работы компаний, в том числе и в области лесного хозяйства. Важность этого осознана и государством, и частными компаниями. Необходимо отметить, что практически полная потеря российскими производителями объемов производства лесозаготовительной техники, а также компетенций по их производству привела к полной зависимости от иностранных производителей [29]. В нынешних условиях наметился интерес к технике отечественного производства, однако для конкуренции с зарубежными производителями требуется время, при этом зарубежные компании продолжают совершенствовать выпускаемую технику, делая ее все более интеллектуальной, в том числе применяя цифровые двойники [30].

Основные зарубежные производители лесозаготовительной техники, такие как «Ponsse», «Komatsu», «John Deere», уделяют большое внимание вопросам цифровизации работы и технического

обслуживания выпускаемых ими лесозаготовительных машин. Цифровизация дает возможность контролировать объемы заготовленной древесины, оптимизировать сортиментные планы для получения максимальной выгоды, осуществлять удаленный мониторинг технического состояния машин, организовывать их техническое обслуживание и ремонт на достаточно высоком уровне.

Заключение

Современный уровень использования высокопроизводительных и дорогостоящих лесозаготовительных машин, применяемых на разных этапах производственного цикла, должен обеспечиваться за счет оперативного планирования и управления, позволяющих обеспечивать высокую эффективность их применения. В то же время, отсутствие в рассмотренном программном обеспечении ведущих компаний модуля моделирования и планирования лесозаготовительных процессов снижает их эффективность, поэтому должно быть доработано.

Современный уровень использования высокопроизводительных и дорогостоящих лесозаготовительных машин, применяемых на разных этапах производственного цикла, должен обеспечиваться за счет оперативного планирования и управления, позволяющих обеспечивать высокую эффективность их применения. В то же время, отсутствие в рассмотренном программном обеспечении ведущих компаний модуля моделирования и планирования лесозаготовительных процессов снижает их эффективность, поэтому должно быть доработано.

Список литературы

1. Tolstykh T.O., Afonin S.E. Strategic development of scientific and technical potential of industry during the digital transformation of economy. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2021;14(4):410-417. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2021-4-410-417>
2. Erboz G. (2020). A qualitative study on industry 4.0 competitiveness in Turkey using Porter diamond model. *Journal of Industrial Engineering and Management* 13(2):266 DOI: 10.3926/jiem.2915
3. Gavrilović, N., Mishra, A. (2021). Software architecture of the internet of things (IoT) for smart city, healthcare and agriculture: analysis and improvement directions. *J Ambient Intell Human Comput* 12, 1315–1336. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02197-3>
4. Parshina I.S., Frolov E.B. Development of a digital twin of the production system on the basis of modern digital technologies. *Ekonomika v promyshlennosti = Russian Journal of Industrial Economics*, 2020. Vol. 13. No. 1. Pp. 29–34. (In Russ.). DOI: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34
5. Ashtari, Behrang & Jung, Tobias & Lindemann, Benjamin & Sahlab, Nada & Jazdi, Nasser & Schloegl, Wolfgang & Weyrich, Michael. (2019). An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System. at - *Automatisierungstechnik*. 67. 762-72. DOI: 10.1515/auto-2019-0039.8
6. Shvedenko, Vladimir & Mozokhin, Andrey. (2020). Concept of digital twins at life cycle stages of production systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 20. 815-827. 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827.
7. Программное обеспечение для управления лесохозяйственным и лесозаготовительным процессами: оценка применимости / А. Н. Заикин, В. В. Сиваков, В. А. Зеликов [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2022. Т.12, № 1(45). С.96-109. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/8
8. Danilović, Milorad & Antonić, Slavica & Stojnić, Dušan & Cirovic, Vladimir & Milikić, Dragiša. (2022). Productivity of Komatsu 951G harvester in tree felling and production wood assortments in forest area damaged by wind. *Topola*. 5-11. DOI:10.5937/topola2209005D.
9. Применение комплексов лесозаготовительных машин в условиях Республики Башкортостан / А. Н. Заикин, В. В. Сиваков, Н. А. Булхов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2022. № 3(387). С. 139-152. DOI 10.37482/0536-1036-2022-3-139-152.
10. Labelle, Eric R. & Kemmerer, Julia. (2022). Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*. 43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.
11. Söderberg, Jon & Wallerman, Jörgen & Almäng, Anders & Möller, Johan & Willén, Erik. (2021). Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 36. 1-9. DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751.

12. Гурский А.С. Использование транспортной телематики и дистанционной диагностики для совершенствования технического обслуживания и ремонта транспортных средств / А. С. Гурский, В. С. Ивашко // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2020. Т.65. №3. С.375-383. DOI 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.
13. Kim, Gyun-Hyung & Kim, Ki-Duck & Lee, Hyeon-Seung & Choi, Yunsung & Mun, Ho-Seong & Oh, Jae-Heun & Shin, Beom-Soo. (2021). Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.
14. Kemmerer, Julia & Labelle, Eric R.. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
15. Kemmerer, Julia & Labelle, Eric R.. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
16. Техническое обслуживание технологических машин на базе цифровизации / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, А. Р. Юсупов, Т. Н. Круглова // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19. № 1. С. 74-80. DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80.
17. Побединский В. В., Ляхов С. В., Салихова М. Н., Иовлев Г. А. Моделирование процессов ТО и Р парка лесозаготовительных машин с учетом производственной эксплуатации // Деревообрабатывающая промышленность. 2020. № 4. С. 3-11. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44572456>
18. 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.
19. Rätty, Janne & Hauglin, Marius & Astrup, Rasmus & Breidenbach, Johannes. (2022). Assessing and mitigating systematic errors in forest attribute maps utilizing harvester and airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Forest Research*. DOI: 10.1139/cjfr-2022-0053.
20. Lopatin, Evgeny & Väättäinen, Kari & Kukko, Antero & Kaartinen, Harri & Hyypä, Juha & Holmström, Eero & Sikanen, Lauri & Nuutinen, Yrjö & Routa, Johanna. (2023). Unlocking Digitalization in Forest Operations with Viewshed Analysis to Improve GNSS Positioning Accuracy. *Forests*. 14. 689. DOI: 10.3390/f14040689.
21. Ovaskainen, Heikki. (2005). Comparison of harvester work in forest and simulator environments. *Silva Fennica*. 39. DOI: 10.14214/sf.398.
22. Capocchi, Irene & Neri, Francesco & Borghini, Tommaso & Bernetti, Iacopo. (2023). Use of virtual reality technology in chainsaw operations, education and training. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. DOI: 10.1093/forestry/cpad007.
23. Rukomoynikov, K.P. & Sergeeva, T.V. & Gilyazova, T.A. & Tsarev, E.M. & Anisimov, P.N. (2023). Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system. *Forestry Bulletin*. 27. 69-80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80.
24. Заикин А.Н., Сиваков В.В., Никитин В.В., Брионес А.А. Программное обеспечение в лесном хозяйстве и при лесозаготовках // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т.27. № 4. С. 172–184. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-172-184
25. Brewer, Julia & Talbot, Bruce & Belbo, Helmer & Ackerman, Pierre & Ackerman, Simon. (2018). A comparison of two methods of data collection for modelling productivity of harvesters: Manual time study and follow-up study using on-board-computer stem records. *Annals of Forest Research*. 61. DOI: 10.15287/afr.2018.962.
26. Ala-Ilomäki, Jari & Salmivaara, Aura & Launiainen, Samuli & Lindeman, Harri & Kulju, Sampo & Finér, Leena & Heikkonen, Jukka & Uusitalo, Jori. (2020). Assessing extraction trail trafficability using harvester CAN-bus data. *International Journal of Forest Engineering*. 31. 1-8. DOI: 10.1080/14942119.2020.1748958.
27. Salmivaara, Aura & Launiainen, Samuli & Perttunen, Jari & Nevalainen, Paavo & Pohjankukka, Jonne & Ala-Ilomäki, Jari & Sirén, Matti & Laurén, Ari & Tuominen, Sakari & Uusitalo, Jori & Pahikkala, Tapio & Heikkonen,

Jukka & Finér, Leena. (2020). Towards dynamic forest trafficability prediction using open spatial data, hydrological modelling and sensor technology. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 93. 662-674. DOI: 10.1093/forestry/cpaa010.

28. Gagliardi, Kayla & Ackerman, Simon & Ackerman, Pierre. (2020). Multi-Product Forwarder-Based Timber Extraction: Time Consumption and Productivity Analysis of Two Forwarder Models Over Multiple Products and Extraction Distances. *Croatian journal of forest engineering*. 41. DOI: 10.5552/crojfe.2020.736.

29. Пискунов М.А. Особенности российского рынка лесозаготовительной техники // *Лесн. журн.* 2020. №6. С.132–147. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-132-147

30. Erpalov, A. & Khoroshevskii, K. & Gadolina, Irina. (2023). Actual problems of creating digital twins of machine engineering products in terms of durability assessment. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 89. 67-75. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-8-67-75.

31. Новиков, А. И. Алгоритм решения задачи оптимального распределения работ в сетевых канонических структурах / А. И. Новиков [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2014. – Т. 4, № 4(16). – С. 309-317. – DOI 10.12737/8515. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/tondhd>.

32. Дорохин, С.В. Математическая модель распределения трудовых ресурсов при технической эксплуатации и ремонте автотранспортных средств / С. В. Дорохин [и др.] // *Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса*. – Орел, 2016. – С. 133-139. <https://elibrary.ru/vxxdjz>.

33. Беляева, Т. П. Оптимальное планирование комплексных проектов создания электронной компонентной базы / Т. П. Беляева, А. П. Затворницкий // *Информационные системы и технологии*. – 2013. – № 3(65). – С. 5-10. <https://elibrary.ru/ntnxin>.

34. Novikova, T. P. Economic evaluation of mathematical methods application in the management systems of electronic component base development for forest machines / T. P. Novikova, A. I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 392. – P. 012035. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012035>.

35. Sokolov, S. V. Determining the Initial Orientation for Navigation and Measurement Systems of Mobile Apparatus in Reforestation / S. V. Sokolov, A. I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 56. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040056>.

36. How to Increase the Analog-to-Digital Converter Speed in Optoelectronic Systems of the Seed Quality Rapid Analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamensky, A. I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/dkxphx>.

37. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>. URL: <https://elibrary.ru/uxpfiq>.

38. К вопросу развития системы энергообразования двигателей внутреннего сгорания / С. В. Дорохин [и др.] // *Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования*. – Воронеж, 2014. – Том 1. – С. 272-274. Режим доступа: <https://elibrary.ru/slkaqt>.

39. Патент № 2714705 Российская Федерация, МПК А01G 23/00. Способ восстановления леса : № 2019115418 : заявл. 20.05.2019 : опубл. 19.02.2020 / А. И. Новиков. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/gzdlvj>.

40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667363 Российская Федерация. Информационная система для участка по ремонту автотранспорта и механизмов : № 2021666981 : заявл. 28.10.2021 : опубл. 28.10.2021 / С. А. Морозов [и др.]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/nrywgh>.

41. Новикова, Т. В. Разработка алгоритма и модели функционирования информационной системы для малого сельскохозяйственного предприятия / Т. В. Новикова [и др.] // *Моделирование систем и процессов*. – 2020. – Т. 13, № 4. С. 53-58. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-13-4-53-58. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/qdcyju>.

42. Novikov, A.I. Production of Complex Knowledgebased Systems: Optimal Distribution of Labor Resources Management in the Globalization Context / A. I. Novikov [et al.] // Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecke Teplice, Slovak Republic. – Rajecke Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 2275-2281. – URL: <https://www.elibrary.ru/yxkpwh>.
43. Авсева, О.В. Математическая модель оптимального распределения работ в сетевых канонических структурах / О. В. Авсева [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 5(301). – С. 48-52. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/sjqbtb>.
44. Евтеев, М.Д. Наноэлектроника: очередной этап развития электронной техники / М. Д. Евтеев [и др.] // Техника и технологии: пути инновационного развития. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2013. – С. 140-142. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/tjbbkj>.
45. Achkasov, V. N. Controlling means of development electronic component basis / V. N. Achkasov [et al.]. – Lorman, MS, USA : Science Book Publishing House LLC, 2013. – 130 p. – ISBN 978-1-62174-001-8. – <https://www.elibrary.ru/rewhat>.
46. Лядов, В.В. Облачные технологии – становление и перспективы развития / В. В. Лядов [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2013. – № 1. – С. 37-39. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/rbjpfr>.
47. Затворницкий, А. П. Оптимальное планирование комплексных проектов создания электронной компонентной базы / А. П. Затворницкий // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 3(65). – С. 5-10. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/ntnxin>.
48. Гидромеханические трансмиссии лесотранспортных машин: технологическая связь с воздействием на почвенно-растительную среду / П. А. Сокол [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 2(50). – С. 179-197. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/PJGNOX>.
49. Евдокимова, С. А. Применение алгоритмов кластеризации для анализа клиентской базы магазина / С. А. Евдокимова [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 4-12. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-14-2-4-12. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/DXGWQN>.
50. Евдокимова, С. А. Анализ товарного ассортимента запасных частей дилерского предприятия автомобильного сервиса с помощью алгоритма FP-Growth / С. А. Евдокимова [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 4. – С. 24-33. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-4-24-33. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/jcnghb>.

References

1. Tolstykh T.O., Afonin S.E. Strategic development of scientific and technical potential of industry during the digital transformation of economy. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2021;14(4):410-417. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2021-4-410-417>
2. Erboz G. (2020). A qualitative study on industry 4.0 competitiveness in Turkey using Porter diamond model. *Journal of Industrial Engineering and Management* 13(2):266 DOI: 10.3926/jiem.2915
3. Gavrilović, N., Mishra, A. (2021). Software architecture of the internet of things (IoT) for smart city, healthcare and agriculture: analysis and improvement directions. *J Ambient Intell Human Comput* 12, 1315–1336. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02197-3>
4. Parshina I.S., Frolov E.B. Development of a digital twin of the production system on the basis of modern digital technologies. *Ekonomika v promyshlennosti = Russian Journal of Industrial Economics*, 2020. Vol. 13. No. 1. Pp. 29–34. (In Russ.). DOI: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34
5. Ashtari, Behrang & Jung, Tobias & Lindemann, Benjamin & Sahlab, Nada & Jazdi, Nasser & Schloegl, Wolfgang & Weyrich, Michael. (2019). An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System. *at - Automatisierungstechnik*. 67. 762-72. DOI: 10.1515/auto-2019-0039.8

6. Shvedenko, Vladimir & Mozokhin, Andrey. (2020). Concept of digital twins at life cycle stages of production systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 20. 815-827. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827.
7. Programmnoe obespechenie dlya upravleniya lesohozyajstvennym i lesozagotovitel'nym processami: ocenka primenimosti / A. N. Zaikin, V. V. Sivakov, V. A. Zelikov [i dr.] // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2022. T.12, № 1(45). S.96-109. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/
8. Danilović, Milorad & Antonić, Slavica & Stojnić, Dušan & Cirovic, Vladimir & Milikić, Dragiša. (2022). Productivity of Komatsu 951G harvester in tree felling and production wood assortments in forest area damaged by wind. *Topola*. 5-11. DOI:10.5937/topola2209005D.
9. Primenenie kompleksov lesozagotovitel'nyh mashin v usloviyah Respubliki Bashkortostan / A. N. Zaikin, V. V. Sivakov, N. A. Bulhov [i dr.] // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2022. № 3(387). S. 139-152. DOI 10.37482/0536-1036-2022-3-139-152.
10. Labelle, Eric R. & Kemmerer, Julia. (2022). Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*. 43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.
11. Söderberg, Jon & Wallerman, Jörgen & Almäng, Anders & Möller, Johan & Willén, Erik. (2021). Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 36. 1-9. DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751.
12. Gurskij A.S. Ispol'zovanie transportnoj telematiki i distancionnoj diagnostiki dlya sovershenstvovaniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta transportnyh sredstv / A. S. Gurskij, V. S. Ivashko // *Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*. 2020. T.65. №3. S.375-383. DOI 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.
13. Kim, Gyun-Hyung & Kim, Ki-Duck & Lee, Hyeon-Seung & Choi, Yunsung & Mun, Ho-Seong & Oh, Jae-Heun & Shin, Beom-Soo. (2021). Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.
14. Kemmerer, Julia & Labelle, Eric R.. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
15. Kemmerer, Julia & Labelle, Eric R.. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
16. Tekhnicheskoe obsluzhivanie tekhnologicheskikh mashin na baze cifrovizacii / A. K. Tugengol'd, R. N. Voloshin, A. R. YUsupov, T. N. Kruglova // *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. T. 19. № 1. S.74-80. DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80.
17. Pobedinskij V. V., Lyahov S. V., Salihova M. N., Iovlev G. A. Modelirovanie processov TO i R parka lesozagotovitel'nyh mashin s uchetom proizvodstvennoj ekspluatacii // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*. 2020. № 4. S. 3-11. Rezhim dostupa: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44572456>
18. Zaikin A. N., Sivakov V. V., Novikova T. P., Zelikov V. A., Stasyuk V. V., CHujkov A. S. Programmnoe obespechenie dlya upravleniya sistemoy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lesnyh mashin: ocenka primenimosti // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2023. T.13. № 2 (50). S. 105–127. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6.
19. Rätty, Janne & Hauglin, Marius & Astrup, Rasmus & Breidenbach, Johannes. (2022). Assessing and mitigating systematic errors in forest attribute maps utilizing harvester and airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Forest Research*. DOI: 10.1139/cjfr-2022-0053.
20. Lopatin, Evgeny & Väätäinen, Kari & Kukko, Antero & Kaartinen, Harri & Hyypä, Juha & Holmström, Eero & Sikanen, Lauri & Nuutinen, Yrjö & Routa, Johanna. (2023). Unlocking Digitalization in Forest Operations with Viewshed Analysis to Improve GNSS Positioning Accuracy. *Forests*. 14. 689. DOI: 10.3390/f14040689.
21. Ovaskainen, Heikki. (2005). Comparison of harvester work in forest and simulator environments. *Silva Fennica*. 39. DOI: 10.14214/sf.398.

22. Capecchi, Irene & Neri, Francesco & Borghini, Tommaso & Bernetti, Iacopo. (2023). Use of virtual reality technology in chainsaw operations, education and training. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. DOI: 10.1093/forestry/cpad007.
23. Rukomoynikov, K.P. & Sergeeva, T.V. & Gilyazova, T.A. & Tsarev, E.M. & Anisimov, P.N. (2023). Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system. *Forestry Bulletin*. 27. 69-80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80.
24. Zaikin A.N., Sivakov V.V., Nikitin V.V., Briones A.A. Programmnoe obespechenie v lesnom hozyajstve i pri lesozagotovkah // *Lesnoj vestnik / Forestry Bulletin*, 2023. T.27. № 4. S. 172–184. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-172-184
25. Brewer, Julia & Talbot, Bruce & Belbo, Helmer & Ackerman, Pierre & Ackerman, Simon. (2018). A comparison of two methods of data collection for modelling productivity of harvesters: Manual time study and follow-up study using on-board-computer stem records. *Annals of Forest Research*. 61. DOI: 10.15287/afr.2018.962.
26. Ala-Ilomäki, Jari & Salmivaara, Aura & Launiainen, Samuli & Lindeman, Harri & Kulju, Sampo & Finér, Leena & Heikkonen, Jukka & Uusitalo, Jori. (2020). Assessing extraction trail trafficability using harvester CAN-bus data. *International Journal of Forest Engineering*. 31. 1-8. DOI: 10.1080/14942119.2020.1748958.
27. Salmivaara, Aura & Launiainen, Samuli & Perttunen, Jari & Nevalainen, Paavo & Pohjankukka, Jonne & Ala-Ilomäki, Jari & Sirén, Matti & Laurén, Ari & Tuominen, Sakari & Uusitalo, Jori & Pahikkala, Tapio & Heikkonen, Jukka & Finér, Leena. (2020). Towards dynamic forest trafficability prediction using open spatial data, hydrological modelling and sensor technology. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 93. 662-674. DOI: 10.1093/forestry/cpaa010.
28. Gagliardi, Kayla & Ackerman, Simon & Ackerman, Pierre. (2020). Multi-Product Forwarder-Based Timber Extraction: Time Consumption and Productivity Analysis of Two Forwarder Models Over Multiple Products and Extraction Distances. *Croatian journal of forest engineering*. 41. DOI: 10.5552/crojfe.2020.736.
29. Piskunov M.A. Osobennosti rossijskogo rynka lesozagotovitel'noj tekhniki // *Lesn. zhurn*. 2020. №6. S.132–147. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-132-147
30. Erpalov, A. & Khoroshevskii, K. & Gadolina, Irina. (2023). Actual problems of creating digital twins of machine engineering products in terms of durability assessment. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 89. 67-75. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-8-67-75.
31. Novikov, A. I. Algorithm for solving the problem of optimal distribution of work in network canonical structures / A. I. Novikov [et al.] // *Forestry engineering Journal*. – 2014. – Vol. 4, No. 4(16). – pp. 309-317. – DOI 10.12737/8515. –URL: <https://elibrary.ru/tondhd>.
32. Dorokhin, S.V. Mathematical model of the distribution of labor resources in the technical operation and repair of motor vehicles / S.V. Dorokhin [et al.] // *Forestry engineering Journal*. – 2014. - Vol. 4, no. 4(16). - pp. 309-317. URL: <https://elibrary.ru/vxxdjz>.
33. Belyaeva, T. P. Optimal planning of complex projects for the creation of an electronic component base / T. P. Belyaeva, A. P. Zatvornitsky // *Information systems and technologies*. – 2013. – № 3(65). – P. 5-10. – <https://elibrary.ru/ntnxin>
34. Novikova, T. P. Economic evaluation of mathematical methods application in the management systems of electronic component base development for forest machines / T. P. Novikova, A. I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 392. – P. 012035. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012035>.
35. Sokolov, S. V. Determining the Initial Orientation for Navigation and Measurement Systems of Mobile Apparatus in Reforestation / S. V. Sokolov, A. I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 56. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040056>.

36. How to Increase the Analog-to-Digital Converter Speed in Optoelectronic Systems of the Seed Quality Rapid Analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamensky, A. I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/dkxphx>.
37. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>. URL: <https://elibrary.ru/uxpfiq>.
38. On the issue of the development of the system of energy formation of internal combustion engines / S. V. Dorokhin [et al.] // *Alternative energy sources in road transport: problems and prospects of rational use*. – Voronezh, 2014. – Iss. 1. – P. 272-274. URL: <https://elibrary.ru/slkaqt>.
39. Patent No. 2714705 Russian Federation. Method of forest restoration / A. I. Novikov. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/gzdlvj>.
40. Certificate of state registration of the computer program No. 2021667363 Russian Federation. Information system for the site for the repair of vehicles and mechanisms : No. 2021666981 : application 28.10.2021 : publ. 28.10.2021 / S. A. Morozov [et al.]. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/nrywgh>.
41. Novikova, T. V. Development of an algorithm and a model of the functioning of an information system for a small agricultural enterprise / T. V. Novikova [et al.] // *Modeling of systems and processes*. – 2020. – Vol. 13, No. 4. pp. 53-58. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-13-4-53-58. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/qdcyju>.
42. Novikov, A.I. Production of Complex Knowledgebased Systems: Optimal Distribution of Labor Resources Management in the Globalization Context / A. I. Novikov [et al.] // *Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecke Teplice, Slovak Republic*. – Rajecke Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 2275-2281. – URL: <https://www.elibrary.ru/yxkpwH>.
43. Avseeva, O.V. Mathematical model of optimal distribution of work in network canonical structures / O. V. Avseeva [et al.] // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. – 2013. – № 5(301). – Pp. 48-52. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/sjqbtb>.
44. Evteev, M.D. Nanoelectronics: the next stage in the development of electronic technology / M. D. Evteev [et al.] // *Technique and technology: ways of innovative development*. – Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2013. – pp. 140-142. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/tjbbkj>.
45. Achkasov, V. N. Controlling means of development electronic component basis / V. N. Achkasov [et al.]. – Lorman, MS, USA : Science Book Publishing House LLC, 2013. – 130 p. – ISBN 978-1-62174-001-8. – <https://www.elibrary.ru/rewhat>.
46. Lyadov, V.V. Cloud technologies – formation and prospects of development / V. V. Lyadov [et al.] // *Modeling of systems and processes*. – 2013. – No. 1. – pp. 37-39. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/rbpjfr>.
47. Zatvornitsky, A. P. Optimal planning of complex projects for the creation of an electronic component base / A. P. Zatvornitsky // *Information systems and technologies*. – 2013. – № 3(65). – P. 5-10. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/ntnxin>.
48. Hydromechanical transmissions of forest transport vehicles: technological connection with the impact on the soil and plant environment / P. A. Sokol [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – V. 13, № 2(50). – P. 179-197. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10. – URL: <https://www.elibrary.ru/PJGNOX>.
49. Evdokimova, S. A. Application of clustering algorithms for the analysis of the customer base of the store / S. A. Evdokimova [et al.] // *Modeling of systems and processes*. – 2021. – V. 14, № 2. – P. 4-12. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-14-2-4-12. – URL: <https://www.elibrary.ru/DXGWQN>.
50. Evdokimova, S. A. Analysis of the product range of spare parts of an automobile service dealer enterprise using the FP-Growth algorithm / S. A. Evdokimova [et al.] // *Modeling of systems and processes*. – 2022. – T. 15, № 4. – P. 24-33. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-4-24-33. – URL: <https://www.elibrary.ru/jenghb>.

Сведения об авторах

Сиваков Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры "Транспортно-технологические машины и сервис" ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, Российская Федерация, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, e-mail: sv@bgitu.ru.

Заикин Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры "Транспортно-технологические машины и сервис" ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, Российская Федерация, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1831-6893>, e-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru.

Новикова Татьяна Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

Зеликов Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент кафедры организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

✉ *Стасюк Владимир Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8689-955X>, e-mail: stasiuk.volodya@yandex.ru.

Чуйков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, Республика Беларусь, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

Information about the authors

Vladimir V. Sivakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Technological University of Engineering, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, e-mail: sv@bgitu.ru.

Anatolii N. Zaikin – Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Technological University of Engineering, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1831-6893>, e-mail: zaikin.anatolij@yandex.ru.

Tatyana P. Novikova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Technology and Microelectronic Engineering, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

Vladimir A. Zelikov – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Transportation Organization and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

✉ *Vladimir V. Stasiuk* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transportation Organization and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8689-955X>, e-mail: stasiuk.volodya@yandex.ru.

Alexey S. Chuikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarussian State Technological University, 13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

✉ – Для контактов | Corresponding author