



Научная статья

УДК 630*326

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-120-135

Эффективность применения лесозаготовительных машин с манипулятором на лесосеке

А.В. Макаренко, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [GON-8614-2022](https://orcid.org/0000-0003-3889-9827),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3889-9827>

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ул. 1-я институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; makarenko@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 10.02.22 / Одобрена после рецензирования 23.05.22 / Принята к печати 26.05.22

Аннотация. Совершенствование методов и моделей предварительного расчета показателей эффективности применения манипуляторных лесозаготовительных машин на лесосечных работах преследует цель улучшить обоснованность использования тех или иных видов машин и технологий для определенных природно-производственных условий. Способом увеличения точности расчетных моделей является более полное и объективное отражение условий производственной среды и протекающих технологических процессов. Рассматривается задача по моделированию передвижения лесозаготовительной машины от одной рабочей стоянки к другой при выборе позиции с наибольшим количеством доступных деревьев. Обсуждается вопрос о распределении деревьев по территории лесосеки, разработан алгоритм и построена имитационная модель поиска мест позиционирования машины на рабочих площадках, выполнена статистическая обработка результатов. Имитационной моделью и ее программной реализацией были сформированы следующие массивы данных, необходимые для оценки эффективности работы машины: расстояние между рабочими стоянками машины с максимальным количеством доступных деревьев, время цикла заготовки и объем деревьев на стоянках. Представлены результаты статистической обработки указанных данных и обоснован выбор теоретических законов распределения вероятностей. Для оценки целесообразности выбора мест для рабочих стоянок машины с учетом расположения деревьев был использован критерий часовой производительности. Он рассчитан для варианта с фиксированным расстоянием передвижения машины, равным разности максимального и минимального вылета манипулятора, и для варианта при поиске мест стоянок с максимальным количеством доступных деревьев. Расчет критерия часовой производительности машины выполнен в виде функции случайных величин, характеризующих условия работы машины на стоянках. Для полученных результатов расчета критерия, который также является случайной величиной, произведена статистическая обработка данных. Сравнение значений критерия по вариантам показало высокую вероятность существенного увеличения производительности манипуляторной лесозаготовительной машины, которое в среднем составляет 8 % при среднем квадратическом отклонении 0,199, при



использовании варианта передвижения машины с выбором места рабочей стоянки с максимально возможным количеством доступных деревьев.

Ключевые слова: рабочая стоянка, валка деревьев, компьютерное моделирование, время цикла, случайная величина, производительность машины

Для цитирования: Макаренко А.В. Эффективность применения лесозаготовительных машин с манипулятором на лесосеке // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 120–135. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-120-135>

Original article

Effective Positioning in Cutting Area of a Harvester Using Computer Modelling

Andrey V. Makarenko, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [GON-8614-2022](https://orcid.org/0000-0003-3889-9827), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3889-9827>

Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; makarenko@mgul.ac.ru

Received on February 10, 2022 / Approved after reviewing on May 23, 2022 / Accepted on May 26, 2022

Abstract. An improvement of methods and models for preliminary estimation of the performance of harvesters in timber production intends to support better justification of the use of certain harvester types and technologies for specific natural and production conditions. It is possible to increase the accuracy of calculation models with a more complete and realistic description of the production environment and operational processes. The article presents a modelling of the harvester's movements across cutting areas for selecting a position with the highest number of accessible trees. The investigational process involved the creation of an algorithm along with a simulation model and the statistical processing of the results. The problem-solving process required consideration of the tree's distribution within the cutting region. The data arrays, which were necessary for efficiency evaluation in the simulation model and its software implementation, were the following: the distance between the working stands of the machine with the maximum number of available trees, the time of cyclic processing, and the number of trees in the area. The results of the statistical analysis of the data are presented with justification from the theoretical laws of probability distribution. The choice of machine working stands, which considered the arrangement of the trees, was estimated using the productivity per hour index. The index was calculated with a constant distance parameter that is equal to the difference between the maximum and the minimum manipulator's movement, and it was also calculated for a stand with a maximum number of accessible trees. The calculation function for the index involves random variables that characterize the working conditions of the stand. The index itself is conceded as a random variable. The values for it were found by statistical data processing. A comparison of the values determined a high probability of a significant increase in the productivity of the harvester. At the stand with the maximum number of trees, it is estimated at around 8 % with a standard deviation of 0.199.

Keywords: working stand, harvesting, computer modelling, time of cyclic processing, random variable, productivity of a machine

For citation: Makarenko A.V. Effective Positioning in Cutting Area of a Harvester Using Computer Modelling. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 120–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-120-135>

Введение

Работа манипуляторных лесозаготовительных машин (валочно-пакетирующая и валочно-трелевочная машины, харвестер и др.), имеющих в наборе выполняемых операций валку или спиливание деревьев с последующей укладкой в пачку, осуществляется с передвижением машины по заданному маршруту при последовательных остановках на рабочих площадках, где производится заготовка определенного количества деревьев в зоне действия манипулятора. Производительность лесозаготовительной машины как один из показателей эффективности ее работы определяется суммарным объемом заготовленной древесины на рабочих площадках за конкретный период времени, который включает суммарную продолжительность работы машины на рабочих площадках, суммарное время переезда машины между площадками, а также дополнительное время на технологические переезды и обслуживание машины. Время цикла работы машины на площадке состоит из времени осуществления нескольких (по количеству деревьев) наборов повторяющихся элементов технологических операций по обработке деревьев. В число этих операций входят наведение манипулятора, выполнение операций захватно-срезающим устройством, валка или перенос дерева и др. [1, 4, 6, 11, 12]. Продолжительность выполнения операций определяется размерами и расположением деревьев относительно машины. Значительный объем экспериментальных исследований и имитационного моделирования работы манипуляторных лесозаготовительных машин при выполнении перечисленных технологических операций на рабочей площадке и в целом по разработке лесосеки отражен в ряде публикаций [2, 16–21].

На основании исследований [3, 7–9, 25] сделан вывод, что количество деревьев на рабочей площадке является случайной величиной, зависящей от среднего диаметра древостоя, запаса древесины на 1 га, расстояния вылета манипулятора машины. Перечисленные факторы – это внешние, или заданные условия работы. Особую группу составляют факторы управления, или решения, принимаемые оператором и подкрепленные компьютерными программами оптимизации и машинного обучения для выполнения технологических операций [6, 13, 24]. Одним из факторов данной группы является выбор места расположения машины (позиционирование) для осуществления операций по заготовке деревьев на рабочей площадке. Основными критериями для выбора места являются количество доступных деревьев для спиливания машиной и среднее время на обработку дерева. Расчет и максимизация 1-го из критериев проводятся с помощью методов аналитической геометрии при известном расположении деревьев относительно направления движения машины. Определение 2-го критерия, когда положение машины выбрано, можно выполнить имитационным моделированием технологических операций по заготовке доступных деревьев.

Выбор рационального места расположения машины и, соответственно, рабочей территории, с которой машина может спиливать деревья, позволяет

максимизировать загрузку машины и снизить долю времени перемещения, приходящуюся на обработку одного дерева. В то же время увеличение среднего количества заготавливаемых деревьев с одного места потребует соблюдения обоснованного порядка их спиливания.

Цель исследования – разработать алгоритм выбора рационального места позиционирования лесозаготовительной машины на рабочей площадке при сплошной рубке на основании критерия роста производительности при уменьшении времени обработки 1 дерева, а также программную реализацию данного алгоритма.

Объекты и методы исследования

Имитационное моделирование передвижения лесозаготовительной машины по лесосеке от одной рабочей стоянки к другой возможно при наличии следующих исходных данных: технических характеристик машины (прежде всего, максимального и минимального вылета манипулятора) и координат расположения деревьев в полосе движения машины. Для расчета времени цикла работы машины по спиливанию и обработке деревьев на стоянке также требуются данные о размерно-качественных характеристиках деревьев: диаметре в месте спиливания, высоте, породе, объеме, количестве и расположении сучьев.

Данные для формирования массива характеристик деревьев можно получить посредством изучения спутниковых снимков или данных аэрофотосъемки [5, 15, 22], наземного обследования лесосеки или разыгрывания значений при помощи вероятностных законов распределения [2, 10, 14, 23]. При разработке и отлаживании модели определение параметров и координат деревьев способом разыгрывания значений (методом Монте-Карло) имеет определенное преимущество, так как может предоставить значительное количество вариантов характеристик древостоя.

В настоящее время существуют отработанные методы разыгрывания координат деревьев и моделей хода роста древостоя. В работе [2] обосновывается метод разыгрывания координат деревьев как 2-мерной случайной величины при помощи равномерного закона распределения вероятностей. При исследовании производительности машин применяется способ разыгрывания расстояний между проекциями расположений деревьев на координатные оси по экспоненциальному, Эрланга или гамма- законам распределения [2]. При изучении процессов развития древостоя [14] распределение деревьев по площади рассматривается как однородное или неоднородное Пуассоновское поле точек с переменной интенсивностью произрастания деревьев на отдельных площадях. Для отражения в имитационных моделях неоднородности плотности произрастания деревьев [10, 14] используется 2-стадийный способ разыгрывания координат деревьев с комбинацией разных законов распределения вероятностей.

На рис. 1 представлен возможный вариант распределения положений деревьев на разрабатываемой ленте, который является примером для решения задачи по поиску оптимальных последовательных мест рабочих стоянок машины.

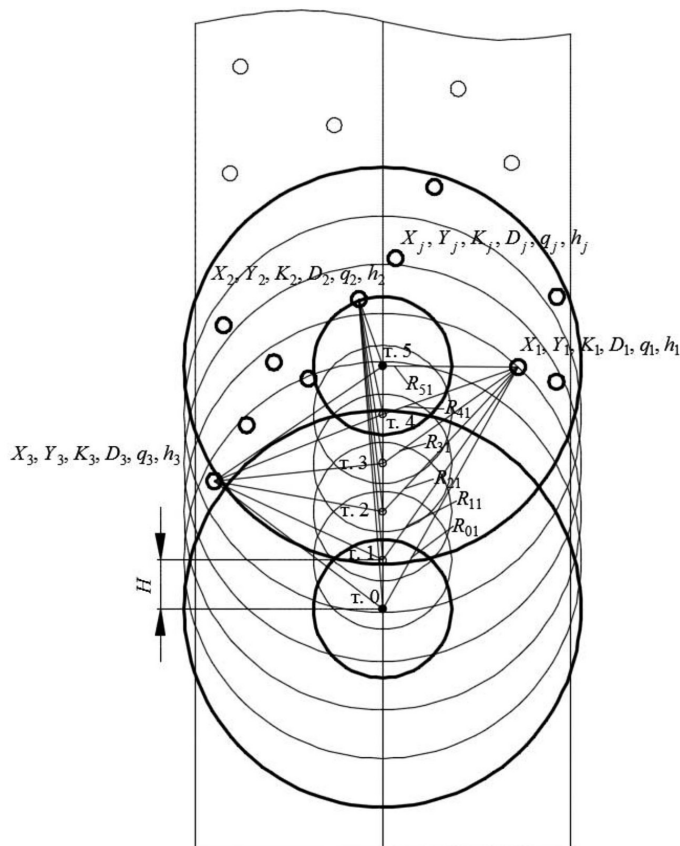


Рис. 1. Схема для моделирования передвижения манипуляторной лесозаготовительной машины при выборе оптимальной позиции. $X_j, Y_j, K_j, D_j, q_j, h_j$ – j -я запись параметров дерева на пасеке (координаты, отметка о выборе, диаметр, объем и высота соответственно); R_{ij} – расстояние от i -й стоянки машины до j -го дерева; $т. i$ – номер точки промежуточного позиционирования машины; H – модельный шаг передвижения машины

Fig. 1. The scheme for modelling the movement of a harvester when choosing the optimal position: $X_j, Y_j, K_j, D_j, q_j, h_j$ – j -th record of the parameters of the tree in a clearing (coordinates, selection mark, diameter, volume and height, respectively); R_{ij} – a distance from the i -th stand of the harvester to the j -th tree; $т. i$ – a number of the intermediate positioning point of the machine; H – a model step of the machine movement

Исходное положение машины на рис. 1 обозначено как $т. 0$. На расстоянии максимального вылета манипулятора R от исходного положения дерева спилены и появление новых деревьев на рабочей площадке возможно только при передвижении машины на новую позицию. Выбор нового места для машины с наибольшим количеством деревьев в зоне действия манипулятора выполняется методом последовательных приближений с шагом передвижения H . Алгоритм расчета передвижения машины представлен на рис. 2.

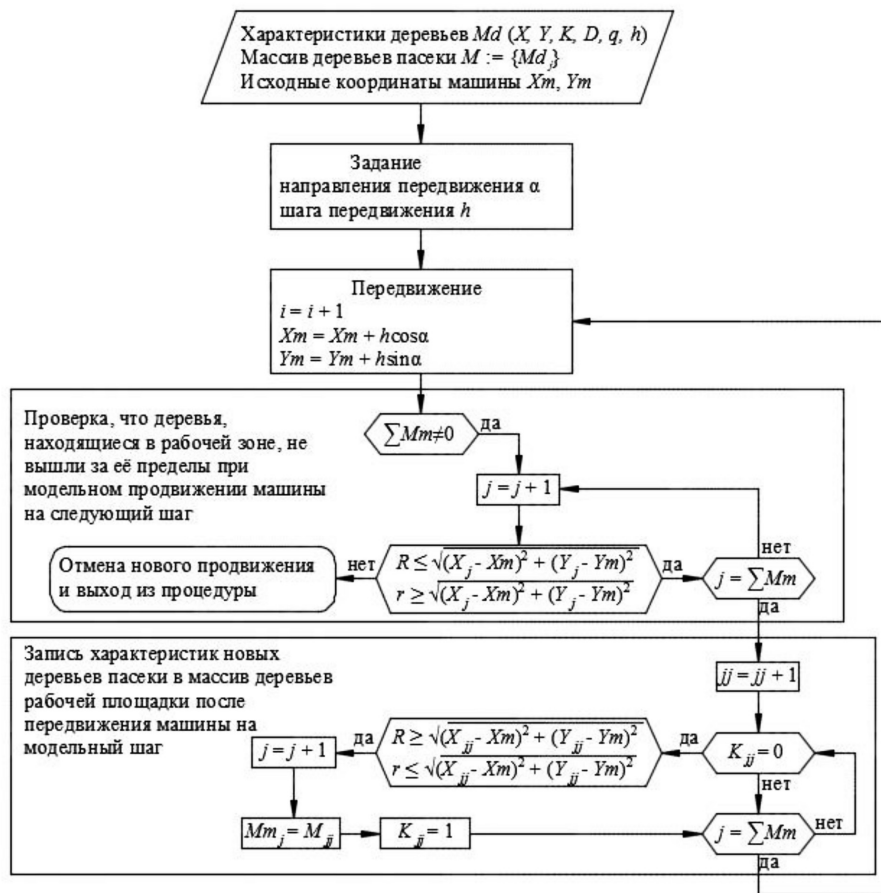


Рис. 2. Алгоритм имитационной модели передвижения машины на новую рабочую площадку

Fig. 2. The algorithm of the simulation model of the movement of the machine to a new work site

Алгоритм имитационной модели по поиску мест стоянок машины выполняется при следующих сформированных данных: есть массивы записей характеристик произрастающих на территории лесосеки деревьев, установлен маршрут передвижения лесозаготовительной машины в координатах разрабатываемой лесосеки и заданы основные технические характеристики машины. Максимальный R и минимальный r вылет манипулятора и др. указаны в соответствии с данными научно-исследовательской работы по теме «Создание производства многофункциональных энергоэффективных и экологически безопасных лесных машин путем использования цифровых технологий в лесозаготовительных операциях». Координаты нового положения машины при ее передвижении на модельный шаг определяются в зависимости от угла примыкания α пасечного волока, по которому движется машина, к магистральному волоку. Если магистральный волок имеет наклон к базовой стороне лесосеки – месту расположения погрузочного пункта, – то угол α представляет собой сумму углов примыкания пасечного волока к магистральному волоку и последнего к базовой стороне лесосеки.

Работа алгоритма модели строится следующим образом. После передвижения машины на один модельный шаг происходит выполнение двух процедур. Первая процедура (модуль 1) производит перебор записей характеристик деревьев в массиве, которые расположены в зоне действия манипулятора машины с прежней позиции. При переборе записей осуществляется вычисление расстояний R_{ij} от нового положения машины до деревьев. По рассчитанным расстояниям проверяется, что деревья не вышли из зоны действия манипулятора и не приблизились к машине ближе чем на минимальный вылет r

$$R \leq R_{i,j} \leq r.$$

Если данное неравенство не соблюдается, то работа модели заканчивается, а координаты машины принимаются равными значениям на предыдущей позиции. Необходимо отметить, что невыполнение этого неравенства возможно только при передвижении машины более чем на $R-r$ от исходного положения.

В модуле 2 производится перебор записей характеристик деревьев, которые располагаются на территории разрабатываемой машиной пасеки, в массиве. Для сокращения расчетов в записи для каждого дерева введен параметр K , принимающий значение 0, если дерево не вырублено или не учтено на рабочей площадке. В противном случае параметр K принимает значение 1. Перебор записей – характеристик деревьев для расчетов расстояний – производится только при $K = 0$. В дальнейшем, как и в модуле 1, происходит сравнение расстояний от деревьев до места расположения машины со значениями максимального и минимального вылета манипулятора. Когда приведенное неравенство для проверяемого расстояния выполняется, характеристики дерева записываются в массив для рабочей площадки, а параметру K данного дерева присваивается значение 1. При невыполнении неравенства запись о дереве пропускается.

На основании составленной модели работы лесозаготовительной машины на пасеке в среде Visual Basic была разработана компьютерная программа, в которой основные этапы моделирования отражаются в отдельных формах. Пример работы форм программы представлен на рис. 3–5.

В результате работы модели по приведенному алгоритму и в среде компьютерной программы получается набор координат стоянок машины по пасечному волоку с максимальным количеством деревьев на рабочих площадках. Пример выбранных мест стоянок на нескольких пасеках лесосеки представлен на рис. 6.

Для принятых в разработанной модели характеристик манипулятора лесозаготовительной машины разница между максимальным и минимальным вылетом составляет 7,5 м. Данная величина представляет собой нижний предел расстояния между стоянками машины, который используется в аналитических расчетах производительности. Как видно из рис. 6, расстояние между стоянками в модели является случайной величиной, существенно превышающей нижний предел. В связи с этим производительность машины является функцией случайной величины расстояния перемещения между стоянками наряду с прочими случайными величинами лесорастительных условий.

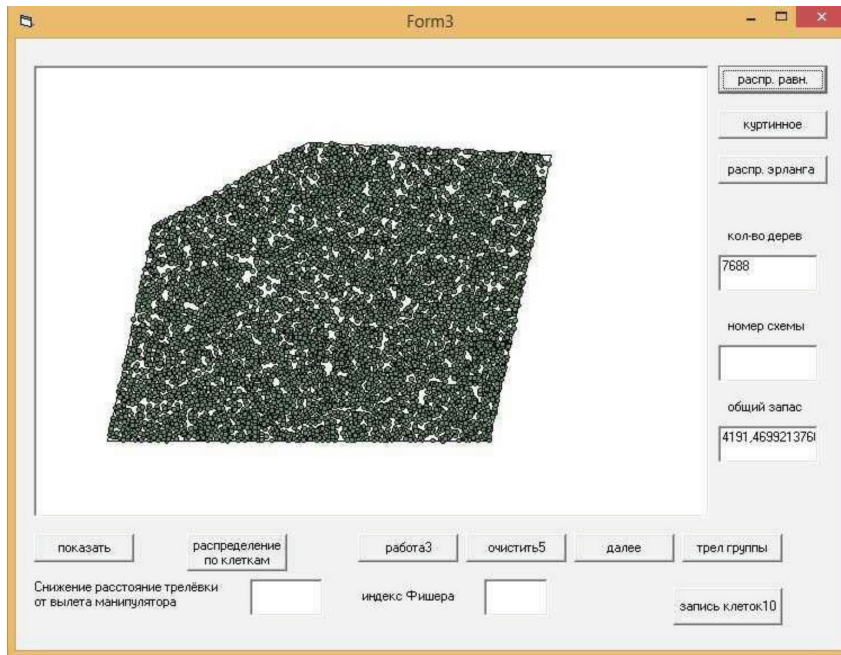


Рис. 3. Разыгрывание расположения деревьев на лесосеке
Fig. 3. Random generation of tree's locations in the cutting area

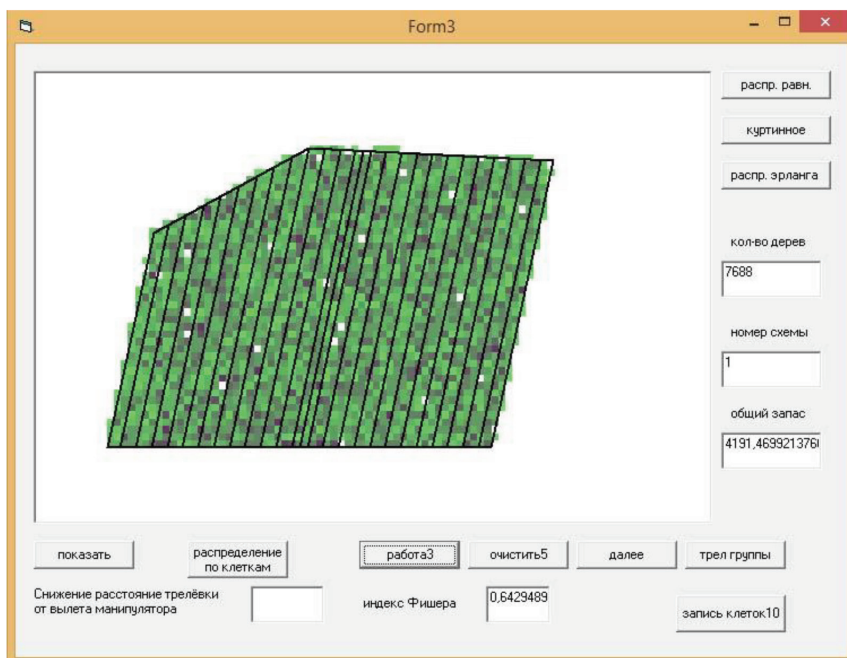
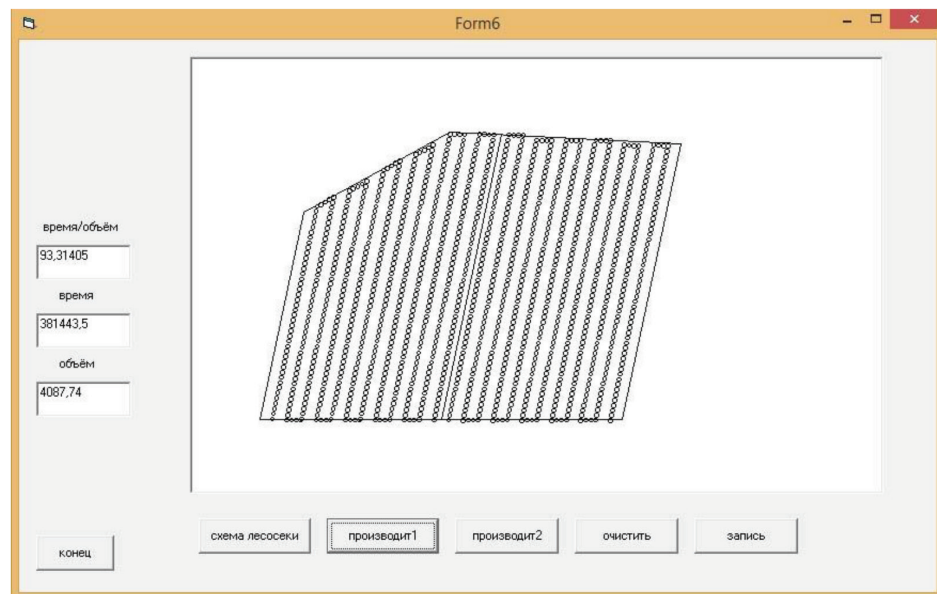
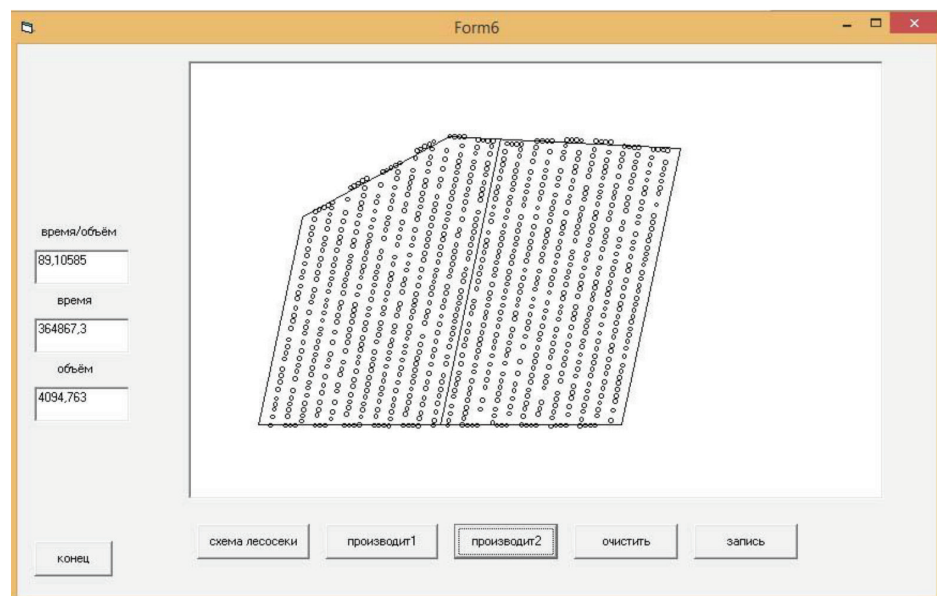


Рис. 4. Проектирование расположения трелевочных волоков и разбиение массива деревьев по пасекам
Fig. 4. Designing the location of the skidding trails and splitting the array of trees by clearing strips



а



б

Рис. 5. Моделирование работы лесозаготовительной машины при ее перемещении: а – на постоянное расстояние $R-r$; б – на площадки с максимальным количеством доступных деревьев

Fig. 5. Modeling the operation of a harvester when it moves: а – across the constant distance $R-r$; б – in the areas with the maximum number of available trees

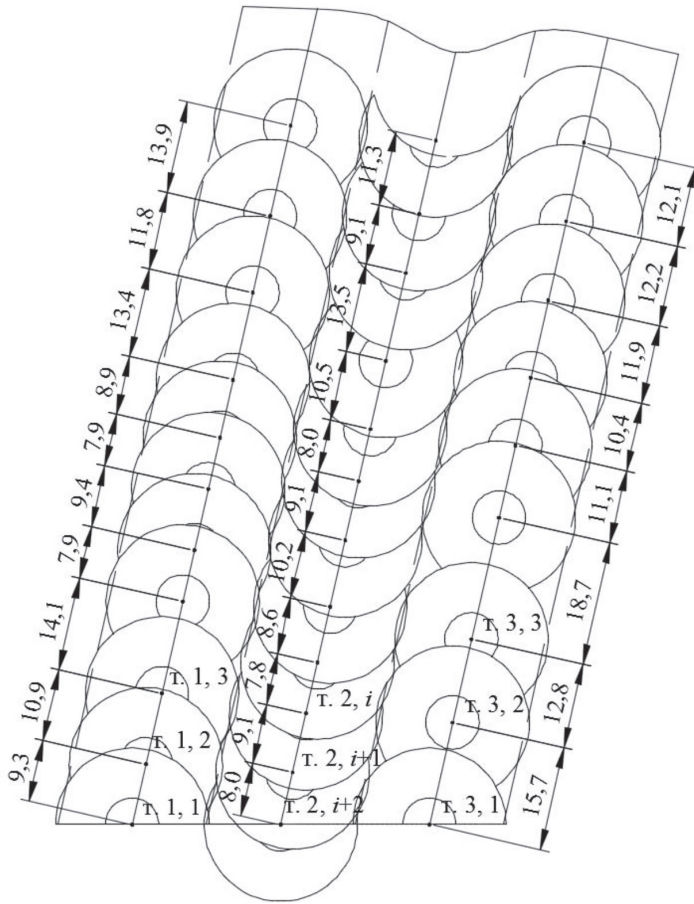


Рис. 6. Расположение рабочих стоянок машины с максимальным количеством доступных деревьев: t, j, i – центр стоянки для j -й пазеки и i -й стоянки

Fig. 6. Location of the working stands of the machine with the maximum number of available trees: t, j, i – parking center for the j -th clearing strip and the i -th stand

Результаты исследования и их обсуждение

Перед статистическим анализом полученных в результате моделирования данных о производительности лесозаготовительной машины была проведена статистическая обработка массива значений расстояния перемещения машины между стоянками с максимальным количеством доступных деревьев. Статистическое распределение массива данных аппроксимировано односторонне-усеченным нормальным законом распределения и гамма-распределением со смещением на величину минимального перемещения машины в массиве данных. Результаты статистической обработки и параметры законов распределения (рис. 7) следующие:

Статистическое распределение:	Усеченный нормальный закон распределения:	Гамма-распределение со смещением:
Минимальное... 7,8	Минимальное..... 7,8	Смещение..... 7,8
Максимальное... 18,7	Максимальное..... ∞	Максимальное..... ∞
Среднее..... 10,53	Среднее полного нормального закона..... 5,65	Интенсивность (критерий Колмогорова λ)..... 0,56
Среднее квадратическое отклонение..... 2,21	Среднее квадратическое отклонение полного нормального закона..... 18,2	Степень (параметр k).... 1,53
	Табличное значение χ^2 при уровне значимости 0,05..... 12,592	Табличное значение χ^2 при уровне значимости 0,05..... 12,592
	Расчетное значение χ^2 8,213	Расчетное значение χ^2 5,02

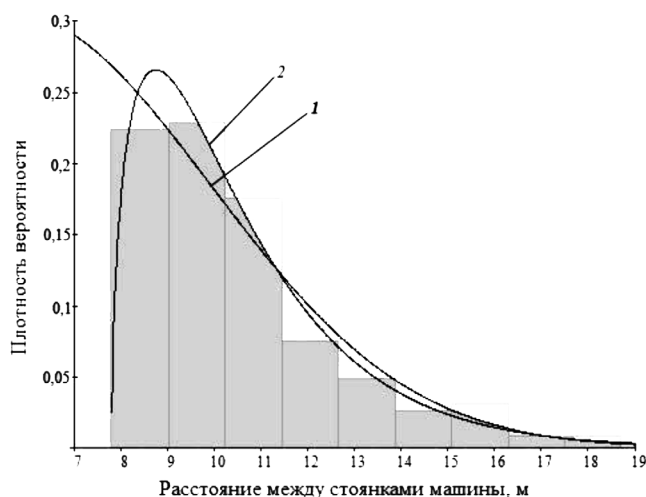


Рис. 7. Гистограмма и теоретические кривые распределения для случайного расстояния между стоянками: 1 – усеченный нормальный закон распределения вероятностей; 2 – сдвинутый гамма-закон распределения

Fig. 7. Histogram and theoretical distribution curves for a random value of the distance between parking lots: 1 – truncated normal probability distribution law; 2 – shifted gamma probability distribution law

На следующем этапе исследования была выполнена статистическая обработка смоделированных массивов данных времени цикла по заготовке деревьев на рабочих площадках при постоянном шаге перемещения машины $R-r$ (1-й вариант) и при шаге перемещения, получаемом при выборе площадок с максимальным количеством доступных деревьев (2-й вариант). Основные статистические параметры массива данных, параметры аппроксимирующих законов распределения вероятностей и значения критерия Пирсона χ^2 сведены в табл. 1. Несмотря на то, что для отдельных ограниченных по объему выборок наблюдалась асимметричность статистического распределения, для выборок значительного объема, охватывающих несколько пазек, распределение вполне симметричное и хорошо согласуется с нормальным законом распределения вероятностей.

Таблица 1

Параметры статистического распределения и нормального закона вероятностей времени цикла заготовки деревьев на рабочей площадке

The statistical distribution parameters and the normal probability law for the time of the cyclic processing on the operating area

Вариант перемещения машины	Значение			Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	$\chi^2_{\text{табл}}$	$\chi^2_{\text{расч}}$
	минимальное	максимальное	среднее				
На расстояние $R-r$	41,835	533,951	283,417	94,693	0,334	14,067	5,669
На моделируемое расстояние	42,120	715,490	373,462	115,767	0,310	12,592	6,923

Следующей случайной величиной, влияющей на производительность машины, является объем заготавливаемой древесины с одной рабочей площадки. Результаты статистической обработки массива данных этой случайной величины, полученных в результате моделирования, и параметры теоретических аппроксимирующих законов распределения вероятностей приведены в табл. 2. Как и ранее, рассматривались варианты перемещения машины между стоянками на расстояние $R-r$ и на расстояние, при котором достигается максимальное количество доступных деревьев.

Таблица 2

Параметры статистического распределения и нормального закона вероятностей объема заготавливаемой древесины на рабочей площадке

The statistical distribution parameters and the normal probability law for the volume of harvested wood on the operating area

Вариант перемещения машины	Значение			Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	$\chi^2_{\text{табл}}$	$\chi^2_{\text{расч}}$
	минимальное	максимальное	среднее				
На расстояние $R-r$	0,537	6,303	3,241	1,149	0,354	14,067	5,410
На моделируемое расстояние	1,441	8,356	4,550	1,429	0,314	12,592	9,349

На основании полученных при моделировании данных для двух вариантов перемещения машины рассчитывалась часовая производительность как функция случайных величин. Для 1-го варианта случайными величинами являются объем заготавливаемой древесины с одной площадки Q_p и время цикла работы машины на площадке $T_{\text{ц}}$. Для 2-го варианта кроме тех же двух величин добавляется третья случайная величина – расстояние перемещения между площадками $L_{\text{рас}}$. Скорость перемещения машины от стоянки к стоянке V принималась в диапазоне пониженной передачи 0–7 км/ч, что соответствует скорости харвестера, указанной в работе, выполненной в рамках названной выше научно-исследовательской темы.

Часовая производительность в виде функции случайных величин по вариантам рассчитывалась по формулам

$$П_{\text{ч1}} = \frac{3600Q_p}{T_{\text{ц}} + \frac{R-r}{V}};$$

$$P_{ч2} = \frac{3600Q_p}{T_{ц} + \frac{L_{рас}}{V}}$$

Статистическая обработка результатов расчетов случайных величин $P_{ч1}$, $P_{ч2}$, отношения $P_{ч2}/P_{ч1}$ и критерии согласия для аппроксимирующего теоретического нормального закона распределения позволила получить данные, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Параметры статистического распределения и нормального закона вероятностей часовой производительности

The statistical distribution parameters and the normal probability law for the productivity per hour index

Вариант	Значение			Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации	$\chi^2_{табл}$	$\chi^2_{расч}$	λ
	минимальное	максимальное	среднее					
$P_{ч1}$	17,610	55,600	38,50	5,310	0,128	14,07	9,14	0,390
$P_{ч2}$	30,730	54,230	40,76	4,230	0,104	12,59	2,96	0,428
$P_{ч2}/P_{ч1}$	0,553	3,079	1,08	0,199	0,184	–	–	–

Из табл. 3 видно, что часовая производительность лесозаготовительной машины как по 1-му варианту передвижения, так и по 2-му вполне согласуется с нормальным законом распределением вероятностей по критериям Пирсона χ^2 и Колмогорова λ . Среднее отношения случайных величин $P_{ч2}/P_{ч1}$ равно 1,08, что говорит о превышении часовой производительности по 2-му варианту при выборе стоянок с максимальным количеством деревьев над производительностью по 1-му варианту с постоянным расстоянием $R-r$ между стоянками в среднем на 8 %.

Выводы

Результаты имитационного моделирования для выбранных исходных данных: среднего запаса на 1 га, среднего объема хлыста, вылета манипулятора машины – позволяют сделать следующие выводы.

1. Увеличение расстояния переезда между стоянками для варианта передвижения машины, при котором остановка производится в месте с максимальным количеством доступных для манипулятора деревьев (2-й вариант), по сравнению с вариантом, когда постоянное расстояние между стоянками равно разности максимального и минимального радиусов вылета манипулятора (1-й вариант), составляет 40,4 %. При этом отношение времени переезда к объему заготавливаемой древесины на рабочих площадках для обоих вариантов остается неизменным.

2. Время работы на рабочей площадке с максимальным количеством доступных деревьев (2-й вариант) увеличивается на 31,8 % по сравнению с 1-м вариантом, при этом отношение времени работы к объему заготовленной древесины снижается на 6,1 %. Такое снижение объясняется тем, что количество заготавливаемой древесины с одной площадки увеличивается на 40,4 %, что

больше увеличения времени работы на площадке с максимальным количеством доступных деревьев.

3. Рост производительности по варианту работы с выбором мест стоянок с максимальным количеством деревьев составляет 8 % (по сравнению с 1-м вариантом) при уменьшении среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации на 20,3 и 18,8 % соответственно. На основании данных о статистическом распределении отношений производительностей для 1-го и 2-го вариантов передвижения машины при вероятности 99,6 % можно говорить об изменении производительности от снижения на 37,3 % до роста на 81,6 % относительно среднего значения 1-го варианта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азарёнок В.А. Экологизированные рубки спелых и перестойных насаждений в реализации концепции сохранения лесорастительной среды (на примере Свердловской области): автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург, 2012. 40 с.

Azarenok V.A. *Ecologically Harvesting of Mature and Overmature Stands in the Implementation of the Concept of Conservation of Forest Ecosystems (A Case Study of Sverdlovsk Region)*: Doc. Agric. Sci. Diss. Abs. Yekaterinburg, 2012. 40 p. (In Russ.).

2. Барановский В.А., Некрасов Р.М. Системы машин для лесозаготовок. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 248 с.

Baranovskiy V.A., Nekrasov R.M. *Machine Systems for Logging*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 248 p. (In Russ.).

3. Герц Э.Ф. Оценка технологии лесопользования на лесосечных работах. Екатеринбург: УГЛУ, 2003. 120 с.

Gerts E.F. *Assessment of Forest Management Technology on Logging Operations*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2003. 120 p. (In Russ.).

4. Григорьев И.В., Редькин А.К., Валяжёнков В.Д., Матросов А.В. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Технология и машины лесосечных работ. СПб.: СПбГЛТА, 2010. 331 с.

Grigoryev I.V., Redkin A.K., Valyazhenkov V.D., Matrosov A.V. *Technology and Equipment of Timber Industries. Technology and Machines of Logging Operations*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2010. 331 p. (In Russ.).

5. Грушин М.А. Распознавание крон деревьев на снимках высокого разрешения // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 6. С. 149–154.

Grushin M.A. Tree Crown Recognition on High Resolution Images. *Lesnoy vestnik = Forest Bulletin*, 2012, no. 6, pp. 149–154. (In Russ.).

6. Захаров В. Системы интеллектуального управления лесных машин // ЛесПромИнформ. 2015. № 6(112). С. 72–78.

Zakharov V. Intelligent Control Systems for Forest Machines. *LesPromInform*, 2015, vol. 6, no. 112, pp. 72–78. (In Russ.).

7. Ильчуков С.В. Динамика горизонтальной структуры производных лиственных насаждений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 6. С. 29–34.

Ilichukov S.V. Dynamics of the Horizontal Structure of Derived Deciduous Plantings. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2003, no. 6, pp. 29–34. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/873/873db22985ff48dfbb622e8cb66934e8.pdf>

8. Каляшов В.А. Обоснование рациональной технологии несплошных рубок при заготовке сортиментов многооперационными машинами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004. 20 с.

Kalyashov V.A. *Substantiation of Rational Technology of Non-Continuous Logging when Harvesting Sortings by Multi-Operation Machines*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2004. 20 p. (In Russ.).

9. Капустин В.А. Число деревьев, срезаемых с одной стоянки валочно-пакегирующей машиной // Изв. вузов. Лесн. журн. 1985. № 2. С. 32–36.

Kapustin V.A. The Number of Trees Cuttings from one Stand by a Feller-Buncher. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1985, no. 2, pp. 32–36. (In Russ.). http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/5ae/32_36.pdf

10. Макаренко А.В., Редькин А.К. Влияние технологических решений на условия и эффективность работы манипуляторных лесозаготовительных машин // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. № 2-С. С. 7–11.

Makarenko A.V., Redkin A.K. The Influence of Technological Solutions on the Conditions and Efficiency of Harvesters. *Lesnoy vestnik* = Forest Bulletin, 2014, no. 2-S, pp. 7–11. (In Russ.).

11. Матвейко А.П. Малоотходные и безотходные технологии в лесном хозяйстве и лесной промышленности. Минск: БГТУ, 1999. 84 с.

Matveiko A.P. *Low-Waste and Zero-Waste Technologies in Forestry and Timber Industry*. Minsk, BSTU Publ., 1999. 84 p. (In Russ.).

12. Меньшиков В.Н. Основы технологии заготовки леса с сохранением и воспроизводством природной среды. Л.: Ленингр. ун-т, 1987. 220 с.

Menshikov V.N. *Fundamentals of Forest Harvesting Technology with Preservation and Reproduction of the Natural Environment*. Leningrad, Leningrad State University Publ., 1987. 220 p. (In Russ.).

13. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2019. 480 с.

Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Deep Learning. Dipping into the World of Neural Networks*. Saint Petersburg, Piter Publ., 2019. 480 p. (In Russ.).

14. Секретенко О.П., Грабарник П.Я. Анализ горизонтальной структуры древостоев методами случайных точечных полей // Сиб. лесн. журн. 2015. № 3. С. 32–44.

Secretenko O.P., Grabarnik P.Ya. Analysis of Tree Stand Horizontal Structure Using Random Point Field Methods. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 3, pp. 32–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20150304>

15. Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.

Sukhikh V.I. *Aerospace Methods in Forestry and Landscape Construction*. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2005. 392 p. (In Russ.).

16. Шегельман И.Р., Будник П.В., Баклагин В.Н. Методика компьютерного эксперимента при определении грузоподъемности и размеров грузового отсека лесной транспортной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 160–173.

Shegelman I.R., Budnik P.V., Baklagin V.N. Computer Experiment Technique for Determining the Load Capacity and Dimensions of the Carrying Compartment of a Forest Vehicle. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 6, pp. 160–173. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.160>

17. Ширнин Ю.А. Моделирование и разработка оптимальных технологических процессов лесосечных работ (для условий Волго-Вятского лесозаготовительного района): автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1993. 42 с.

Shirnin Yu.A. *Modelling and Development of Optimal Technological Processes of Logging Operations (for Conditions of Volgo-Vyatsky Forest-Economic Region)*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1993. 42 p. (In Russ.).

18. Ширнин Ю.А., Онучин Е.М. Имитационное моделирование движения многооперационной лесной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 4. С. 66–72.

Shirnin Yu.A., Onuchin E. M. Simulation of Movement of Multi-Function Logging Machine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2003, no. 4, pp. 66–72. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a6c/a6c9e8eb8c696f395f0f44a8cf739672.pdf>

19. Ackerman S.A., Talbot B., Astrup R. The Effect of Tree and Harvester Size on Productivity and Harvester Investment Decisions. *International Journal of Forest Engineering*, 2021, vol. 33, no. 1, pp. 22–32. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1981046>

20. Bilici E. Investigation of Feller-Buncher Performance Using Weibull Distribution. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 284. <https://doi.org/10.3390/f12030284>

21. Liski E., Jounela P., Korpunen H., Sosa A., Lindroos O., Jylhä P. Modeling the Productivity of Mechanized CTL Harvesting with Statistical Machine Learning Methods. *International Journal of Forest Engineering*, 2020, vol. 31, iss. 3, pp. 253–262. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1820750>

22. Makarenko A.V., Redkin A.K., Bykovsky M.A., Shadrin A.A. Using Space Images of Forest Territories for Their Statistical Analysis. *Proceedings of the AIP Conference Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration*. AIP Publishing Publ., 2019, vol. 2171, iss. 1, pp. 158–169. <https://doi.org/10.1063/1.5133252>

23. Miyajima R.H., Fenner P.T., Batistela G.C., Simões D. Technical-Economic Analysis of Grapple Saw: A Stochastic Approach. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2020, vol. 41, iss. 2, pp. 219–229. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.681>

24. Noordermeer L., Sørngård E., Astrup R., Næsset E., Gobakken T. Coupling a Differential Global Navigation Satellite System to a Cut-To-Length Harvester Operating System Enables Precise Positioning of Harvested Trees. *International Journal of Forest Engineering*, 2021, vol. 32, no. 2, pp. 119–127. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1899686>

25. Wang J., LeDoux C.B., Li Y. Simulating Cut-to-Length Harvesting Operations in Appalachian Hardwoods. *International Journal of Forest Engineering*, 2005, vol. 16, no. 2, pp. 11–27. <https://doi.org/10.1080/14942119.2005.10702510>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest