

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства
и переработки древесины

Научная статья
УДК 630.3
doi: 10.28983/asj.y2024i6pp134-142

**Моделирование движений харвестера
при выборочных рубках леса**

**Татьяна Владиславовна Сергеева, Константин Павлович Рукомойников, Евгений Михайлович Царев,
Юрий Александрович Ширнин, Игорь Валерьевич Петухов**

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия
e-mail: info@volgatech.net

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы моделирования работы лесосечных машин в различных природно-производственных условиях лесосек. Особое внимание уделено работе харвестеров при выполнении выборочных рубок леса. Целью исследования является создание математических зависимостей, позволяющих провести сравнительную теоретическую оценку траектории движения манипулятора харвестера при имитационном моделировании пространственного размещения деревьев. В ходе достижения поставленной цели создана расчетная схема к определению расстояний перемещения манипулятора и харвестера при наведении манипулятора на растущее дерево и перемещении поваленного дерева в зону раскряжевки. Одной из отличительных характеристик проведенного исследования является анализ выбора траектории движения манипулятора при реализации выборочных рубок. Авторы приводят последовательный вывод искомых математических зависимостей на основе основных принципов геометрии, что позволяет убедиться в достоверности теоретического подхода и степени его адекватности реальным производственным условиям. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о значительном влиянии числа деревьев в зоне действия манипулятора на продолжительность работы харвестера. Проведенные расчеты показывают, что наличие деревьев нецелевого компонента в зоне работы манипулятора может повысить трудозатраты на 15 %. Это свидетельствует о степени влияния, остающихся на лесосеке деревьев нецелевого компонента, и наглядно демонстрирует возможность их учета при моделировании производительности лесосечных машин.

Ключевые слова: математическое моделирование; рабочие позиции харвестера; лесосечные работы; выборочная рубка; имитационное моделирование

Для цитирования: Сергеева Т. В., Рукомойников К. П., Царев Е. М., Ширнин Ю. А., Петухов И. В. Моделирование движений харвестера при выборочных рубках леса // Аграрный научный журнал. 2024. № 6. С. 134–142. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i6pp134-142>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Simulation of harvester movements during
selective cuttings**

Tatiana V. Sergeeva, Konstantin P. Rukomojnikov, Evgeny M. Tsarev, Yuri A. Shirnin, Igor V. Petukhov
Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia.

e-mail: info@volgatech.net.

Abstract. The article deals with the issues of modeling the operation of cutting machines in various natural and industrial conditions of cutting areas. Particular attention is paid to the work of harvesters when performing selective logging. The aim of the study is to create mathematical dependencies that allow for a comparative theoretical assessment of the trajectory of the harvester manipulator during simulation modeling of the spatial placement of trees. In the course of achieving this goal, a calculation scheme was created to determine the distances of movement of the manipulator and the harvester when pointing the manipulator at a growing tree and moving the fallen tree to the bucking zone. One of the distinctive characteristics of the conducted research is the analysis of the choice of the trajectory of the manipulator during the implementation of selective logging. The authors provide a consistent



conclusion of the desired mathematical dependencies based on the basic principles of geometry, which makes it possible to verify the reliability of the theoretical approach and the degree of its adequacy to real production conditions. The analysis of the obtained dependencies allows us to conclude that the number of trees in the manipulator's area of operation significantly affects the duration of the harvester. The calculations show that the presence of trees of a non-target component in the work area of the manipulator can increase labor costs by 15%. This indicates the degree of influence of non-target component trees remaining in the cutting area, and clearly demonstrates the possibility of taking them into account when modeling the performance of cutting machines.

Keywords: mathematical modeling; harvester working positions; logging works; selective felling; simulation modeling

For citation: Sergeeva T. V., Rukomojnikov K. P., Tsarev E. M., Shirnin Yu. A., Petukhov I. V. Simulation of harvester movements during selective cuttings. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(6):134–142. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i6pp134-142>.

Введение. В настоящее время многие исследователи в области лесопользования уделяют внимание технологии реализации лесосечных работ с использованием валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин (харвестеров) [4, 6, 15, 18]. Постановка экспериментальных исследований на лесных участках трудоемка ввиду необходимости планирования значительного числа опытов и не всегда оправдана в результате сложности обеспечения их воспроизводимости в различных природно-производственных условиях лесосек [2, 3, 11, 14]. Это приводит к повышенному вниманию исследователей к имитационному моделированию технологических процессов лесосечных работ, в частности, с использованием харвестеров. Исследованиями в данном направлении занимались различные российские [5, 8, 9, 10] и зарубежные [13, 16, 17] ученые. Все они сходятся во мнении о том, что трудозатраты и эффективность работы харвестеров во многом связаны не только с объемными показателями обрабатываемых стволов деревьев, но и зависят от числа и взаимного расположения деревьев, остающихся на лесосеке. Детальная имитация работы многофункциональных лесных машин невозможна без пространственного моделирования всех растущих на лесосеке деревьев и перемещений манипулятора при их последующей обработке [1, 7, 20]. Решение данного вопроса наиболее актуально при выполнении выборочных рубок леса [19]. Именно при них остающиеся после рубки дерева, подрост хозяйственно ценных пород и подлесок создают максимальные препятствия на пути движения манипулятора и оказывают значительное влияние на изменение его траектории движения и осуществление частых корректировок рабочих позиций для захвата и обработки деревьев [12].

Цель исследования – создание математических зависимостей, позволяющих провести сравнительную теоретическую оценку траектории движения манипулятора харвестера при имитационном моделировании пространственного размещения деревьев.

Материалы и методы. Одной из отличительных характеристик проведенного исследования является анализ выбора траектории движения манипулятора при реализации выборочных рубок. В основе его лежит анализ зоны движения манипулятора по кратчайшему расстоянию до анализируемого дерева. Если в этой зоне фиксируется наличие каких-либо деревьев, то они представляют собой препятствия для свободного перемещения харвестерной головки и принимается решение о невозможности ее перемещения по кратчайшему расстоянию до дерева. В этом случае выявляется необходимость анализа возможности двухэтапного движения манипулятора. Первый этап предусматривает поворот манипулятора по минимально возможному радиусу поворота из первоначального его положения в зону дальнейшего прямолинейного движения для обхода препятствий. Второй этап предусматривает анализ наличия препятствий в зоне прямолинейного движения манипулятора. Третий этап осуществляется после валки дерева, в след за захватом и спиливанием, и предусматривает его перемещение его в зону раскряжевки, находящуюся в противоположной от разрабатываемого сектора стороне волока.

Результаты исследований. Расчетная схема к обоснованию расстояний перемещения манипулятора 1 и харвестера 2 в процессе захвата и обработки стволов деревьев представлена на рис. 1.

Основными расчетными точками являются: $K(x_K, y_K)$ – первоначальное расположение харвестерной головки; $D(x_D, y_D)$ – расположение анализируемого дерева; $G(x_G, y_G)$, $G'(x_{G'}, y_{G'})$ – анализируемые зоны раскряжевки деревьев; $N(x_N, y_N)$ – точка совмещения криволинейной и прямолинейной траекторий движения харвестерной головки; $M(x_M, y_M)$ – расположение оси вращения манипулятора при установке харвестера на рабочей позиции.

В тех случаях, когда в зоне движения манипулятора по кратчайшему расстоянию до анализируемого дерева и в границах зоны безопасности от нее есть препятствия, движение манипулятора



осуществляется по траектории \widehat{KND} . Актуальность этого варианта работы харвестера наиболее очевидна при выборочных рубках леса. Для расчета длины этого пути необходимо определить местоположение точки $N(x_N, y_N)$. Составим систему уравнений поиска точки пересечения прямой линии MD (линии прямолинейного движения захвата манипулятора) и окружности с центром в точке $M(x_M, y_M)$ и радиусом R_{\min} .

$$\begin{cases} \frac{x_N - x_M}{x_D - x_M} = \frac{y_N - y_M}{y_D - y_M} = 0 \\ (x_N - x_M)^2 + (y_N - y_M)^2 - R_{\min}^2 = 0 \end{cases}$$

где R_{\min} – минимальный радиус поворота манипулятора, м; x_N, y_N – координаты точки N , м; x_M, y_M – координаты точки M , м; x_D, y_D – координаты точки D , м.

Решив систему уравнений относительно x_N , получим:

$$x_N = - \frac{\left(x_M^3 - 2x_M^2x_D + x_Mx_D^2 + x_My_M^2 - 2x_My_My_D + x_My_D^2 \right)}{\left(x_M^2 - 2x_Mx_D + x_D^2 + y_M^2 - 2y_My_D + y_D^2 \right)} - \frac{R_{\min}(x_M - x_D)}{\sqrt{x_M^2 - 2x_Mx_D + x_D^2 + y_M^2 - 2y_My_D + y_D^2}}$$

$$y_N = \frac{x_Ny_M - x_Ny_D + x_My_D - x_Dy_M}{x_M - x_D}$$

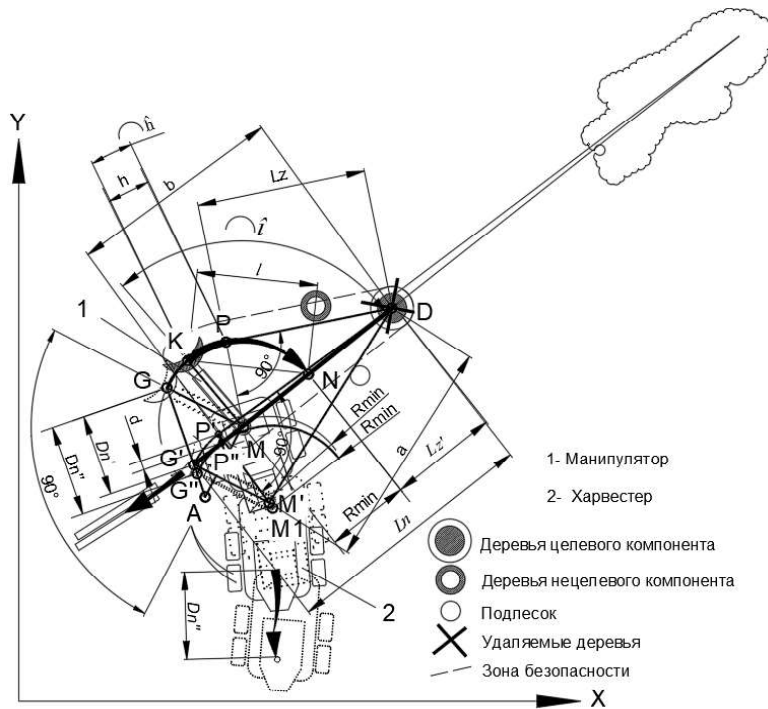


Рисунок 1 – Расчетная схема к определению расстояний перемещения манипулятора и харвестера при наведении манипулятора на растущее дерево и перемещении поваленного дерева в зону раскряжевки

Figure 1 – Calculation diagram for determining the distances of movement of the manipulator and harvester when pointing the manipulator at a growing tree and moving the fallen tree to the bucking zone

Тогда длину дуги (\hat{l}) в метрах, соответствующую расстоянию перемещения манипулятора из точки $K(x_K, y_K)$ в точку $N(x_N, y_N)$, можно рассчитать по формуле

$$\hat{l} = 2R_{\min} \operatorname{asin} \left(\frac{l}{2R_{\min}} \right),$$

где l – кратчайшее расстояние между точками KN , м.



Расстояние перемещения захвата манипулятора из точки $N(x_N, y_N)$ в точку $D(x_D, y_D)$, выраженное в метрах, будет равно:

$$Lz' = \sqrt{(x_N - x_D)^2 + (y_N - y_D)^2}.$$

Общее расстояние перемещения захвата манипулятора из зоны его первоначального расположения (точка K) до захватываемого дерева (точка D) по криволинейной траектории (\widehat{KND}) составит:

$$\widehat{KND} = \hat{l} + Lz'.$$

После спиливания и валки дерева, оно должно быть перемещено в точку $G(x_G, y_G)$, представляющую собой зону раскряжевки деревьев, поваленных в противоположных к волоку секторах работы манипулятора. Однако, если на площади $MGKPD$ и в пределах зоны безопасности рядом с ней есть препятствия, то прямолинейное перемещение захвата вдоль оси ствола поваленного дерева доступно лишь после перемещения харвестера назад до появления возможности подтаскивания поваленного дерева вдоль его оси в точку $G'(x_{G'}, y_{G'})$.

С целью расчета расстояния перемещения харвестера назад для корректировки рабочей позиции составим систему уравнений прямой GA , проходящей через зону планируемой раскряжевки и параллельной движению харвестера, и прямой, содержащей отрезок MD .

$$\begin{cases} \frac{x_{G'} - x_G}{x_A - x_G} - \frac{y_{G'} - y_G}{y_A - y_G} = 0 \\ \frac{x_{G'} - x_M}{x_D - x_M} - \frac{y_{G'} - y_M}{y_D - y_M} = 0 \end{cases}$$

где $x_{G'}, y_{G'}$ – координаты точки G' , м; x_G, y_G – координаты точки G , м; x_A, y_A – координаты точки A , м.

Решив систему уравнений относительно $y_{G'}$, получим:

$$y_{G'} = \frac{\frac{x_M - \frac{x_G y_A - x_A y_G}{y_G - y_A}}{x_M - x_D} - \frac{y_M}{y_M - y_D}}{\frac{1}{y_M - y_D} - \frac{x_G - x_A}{(x_M - x_D) \cdot (y_G - y_A)}}$$

$$x_{G'} = \frac{x_G y_{G'} - x_A y_{G'} - x_G y_A + x_A y_G}{y_G - y_A}.$$

Расстояние перемещения харвестера назад (Dn'), выраженное в метрах, подходящее для создания условий подтаскивания к машине ствола дерева, составит:

$$Dn' = \sqrt{(x_G - x_{G'})^2 + (y_G - y_{G'})^2}.$$

Однако данная зависимость составлена без учета криволинейной составляющей движения манипулятора относительно его оси. Подобное перемещение машины создает условия перемещения дерева по траектории $DP'G'$, которая не обеспечивает прямолинейного перемещения поваленного дерева вдоль его оси.

Для обеспечения подтаскивания ствола поваленного дерева к харвестеру по траектории $DP''G'$, необходимо дополнительное смещение машины на расстояние d назад.

Для расчета величины d определим координаты точки M' .

$$x_{M'} = x_M + x_{G'} - x_G;$$

$$y_{M'} = y_M + y_{G'} - y_G;$$

где $x_{M'}, y_{M'}$ – координаты точки M' , м.

Найдем точку $P'(x_{P'}, y_{P'})$, как точку пересечения окружности радиусом R_{\min} центром в точке M' с касательной, проведенной из точки $D(x_D, y_D)$.

Для этого рассчитаем гипотенузу a , м, и катет b , м, прямоугольного треугольника $M'P'D$. Получим

$$a = \sqrt{(x_{M'} - x_D)^2 + (y_{M'} - y_D)^2}; \quad b = \sqrt{a^2 - R_{\min}^2},$$



Составим систему уравнений для окружностей с центрами в точках M' и D .

$$\begin{cases} (x_D - x_{P'})^2 + (y_D - y_{P'})^2 - b^2 = 0 \\ (x_{M'} - x_{P'})^2 + (y_{M'} - y_{P'})^2 - R_{\min}^2 = 0, \end{cases}$$

где $x_{P'}, y_{P'}$ – координаты точки P' , м.

Решим систему уравнений:

$$y_{P'} = y_D - b + \frac{\begin{pmatrix} R_{\min}^2 y_D - R_{\min}^2 y_{M'} - b^2 y_D + \\ + b^2 y_{M'} + 2b x_D^2 - \\ - 4b x_D x_{M'} + 2b x_{M'}^2 + 2b y_D^2 - \\ - 4b y_D y_{M'} + 2b y_{M'}^2 - \\ - x_D^2 y_D + x_D^2 y_{M'} + 2x_D x_{M'} y_D - \\ - 2x_D x_{M'} y_{M'} - x_{M'}^2 y_D + x_{M'}^2 y_{M'} - \\ - y_D^3 + 3y_D^2 y_{M'} - 3y_D y_{M'}^2 + y_{M'}^3 \end{pmatrix}}{2 \begin{pmatrix} x_D^2 - 2x_D x_{M'} + x_{M'}^2 + y_D^2 - \\ - 2y_D y_{M'} + y_{M'}^2 \end{pmatrix}} + \frac{\begin{pmatrix} 2R_{\min} b - R_{\min}^2 - \\ - b^2 + x_D^2 - \\ - 2x_D x_{M'} + x_{M'}^2 + \\ + y_D^2 - 2y_D y_{M'} + y_{M'}^2 \end{pmatrix}}{\sqrt{\begin{pmatrix} R_{\min}^2 + 2R_{\min} b + b^2 - \\ - x_D^2 + 2x_D x_{M'} - x_{M'}^2 - \\ - y_D^2 + 2y_D y_{M'} - y_{M'}^2 \end{pmatrix}}}$$

$$x_{P'} = x_D - \sqrt{b + y_{P'} - y_D} \cdot \sqrt{b - y_{P'} + y_D}.$$

Уравнение прямой GG' будет иметь вид:

$$y = -\frac{b - y_G}{x_G} \cdot x + \frac{x_G y_{G'} - x_{G'} y_G}{x_G - x_{G'}}.$$

Составим уравнение прямой параллельной прямой GG' , проходящей через точку $P'(x_{P'}, y_{P'})$. Уравнение искомой прямой будет иметь вид

$$y = y_{P'} + (x_{P'} - x) \cdot \frac{(b - y_G)}{x_G}.$$

Запишем систему уравнений для прямых $P'P''$ и DM .

$$\begin{cases} y_{P''} = y_{P'} + (x_{P'} - x_{P''}) \cdot \frac{(b - y_G)}{x_G} \\ \frac{x_{P''} - x_M}{x_D - x_M} - \frac{y_{P''} - y_M}{y_D - y_M} = 0, \end{cases}$$

где $x_{P''}, y_{P''}$ – координаты точки P'' , м.

$$x_{P''} = \frac{\frac{y_{P'} - y_M + \frac{x_{P'}(b - y_G)}{x_G}}{y_D - y_M} + \frac{x_M}{x_D - x_M}}{\frac{1}{x_D - x_M} + \frac{b - y_G}{x_G(y_D - y_M)}}$$

$$y_{P''} = y_{P'} + (x_{P'} - x_{P''}) \cdot \frac{(b - y_G)}{x_G}.$$

Дополнительное смещение машины на расстояние d , выраженное в метрах, для обеспечения подтаскивания ствола поваленного дерева к харвестеру по траектории $DP''G'$, составит

$$d = \sqrt{(x_{P'} - x_{P''})^2 + (y_{P'} - y_{P''})^2}.$$



Тогда расстояние перемещения харвестера назад Dn'' , выраженное в метрах и подходящее для подтаскивания к машине ствола поваленного дерева по этой траектории, без повреждения, находящихся в зоне действия манипулятора остающихся на доразчивание деревьев нецелевого компонента, составит:

$$Dn'' = Dn' + d = \sqrt{(x_G - x_{G'})^2 + (y_G - y_{G'})^2} + \sqrt{(x_{P'} - x_{P''})^2 + (y_{P'} - y_{P''})^2}.$$

Расстояние перемещения манипулятора с поваленным деревом от места валки (точка $D(x_D, y_D)$) в зону раскрывки (точка $G'(x_{G'}, y_{G'})$) по прямолинейной траектории можно найти по формуле:

$$Ln = \sqrt{(x_D - x_{G'})^2 + (y_D - y_{G'})^2}.$$

Второй, наиболее простой вариант захвата ствола дерева возможен в том случае, когда на пути движения манипулятора по кратчайшему расстоянию из точки его первоначального расположения $K(x_K, y_K)$ к растущему дереву в точку $D(x_D, y_D)$ в зоне движения манипулятора, ограниченной фигурой $MKPD$ и в пределах зоны безопасности рядом с ним нет препятствий.

В этом случае расстояние перемещения харвестерной головки из точки $K(x_K, y_K)$ в точку $D(x_D, y_D)$ будет равно:

$$\overline{KPD} = \hat{h} + Lz.$$

где \hat{h} – длина дуги, соответствующая расстоянию перемещения манипулятора из точки $K(x_K, y_K)$ в точку $P(x_P, y_P)$, м; Lz – расстояние перемещения захвата манипулятора из точки $P(x_P, y_P)$ в точку $D(x_D, y_D)$, м.

Проведя расчеты, получим:

$$Lz = \sqrt{(x_M - x_D)^2 + (y_M - y_D)^2 - R_{\min}^2}.$$

$$y_P = y_D - Lz + \frac{\left(\begin{array}{l} R_{\min}^2 y_D - R_{\min}^2 y_M - Lz^2 \cdot y_D + \\ + Lz^2 y_M + 2Lz x_D^2 - \\ - 4Lz x_D x_M + 2Lz x_M^2 + 2Lz y_D^2 - \\ - 4Lz y_D y_M + 2Lz y_M^2 - \\ - x_D^2 y_D + x_D^2 y_M + 2x_D x_M y_D - \\ - 2x_D x_M y_M - x_M^2 y_D + x_M^2 y_M - \\ - y_D^3 + 3y_D^2 y_M - 3y_D y_M^2 + y_M^3 \end{array} \right)}{2(x_D^2 - 2x_D x_M + x_M^2 + y_D^2 - 2y_D y_M + y_M^2)} + (x_D - x_M) \cdot \sqrt{\left(\begin{array}{l} 2R_{\min} Lz - R_{\min}^2 - \\ - Lz^2 + x_D^2 - \\ - 2x_D x_M + x_M^2 + \\ + y_D^2 - 2y_D y_M + y_M^2 \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{l} R_{\min}^2 + 2R_{\min} Lz + Lz^2 - \\ - x_D^2 + 2x_D x_M - x_M^2 - \\ - y_D^2 + 2y_D y_M - y_M^2 \end{array} \right)}$$

$$x_P = x_D - \sqrt{Lz + y_P - y_D} \cdot \sqrt{Lz - y_P + y_D}.$$

Кратчайшее расстояние между точкой первоначального положения захвата харвестера $K(x_K, y_K)$ и точкой $P(x_P, y_P)$, выраженное в метрах и позволяющее вывести захват на прямолинейную траекторию движения, равно:

$$h' = \sqrt{(x_P - x_K)^2 + (y_P - y_K)^2}.$$

Тогда длину дуги в метрах, соответствующую расстоянию перемещения манипулятора из точки $K(x_K, y_K)$ в точку $P(x_P, y_P)$ можно рассчитать по формуле

$$\hat{h} = 2R_{\min} \operatorname{asin} \left(\frac{h'}{2R_{\min}} \right).$$

Обратное движение манипулятора с поваленным деревом должно быть осуществлено в зону раскрывки деревьев, поваленных в противоположных к волоку секторах работы манипулятора, обозначенную точкой $G(x_G, y_G)$. Это возможно по кратчайшей траектории \overline{GKPD} так как по условию задачи на площади $MGKPD$ и в пределах зоны безопасности рядом с ней отсутствуют



препятствия. Расстояние перемещения харвестерной головки с поваленным деревом можно рассчитать по формуле:

$$\bar{GPD} = Lz + 2R_{\min} \operatorname{asin} \left(\frac{\sqrt{(x_P - x_G)^2 + (y_P - y_G)^2}}{2R_{\min}} \right).$$

В качестве примера расчета рассмотрим следующие исходные данные, характеризующие взаимное расположение харвестера, харвестерной головки и назначенного в рубку дерева по отношению к погрузочному пункту с координатами 0,0: $x_M = 285$ м; $y_M = 218,2$ м; $x_K = 283,9$ м; $y_K = 221$ м; $x_D = 292$ м; $y_D = 222$ м; $x_G = 282,9$ м; $y_G = 220,3$ м; $x_A = 282,9$ м; $y_A = 216,1$ м; $R_{\min} = 3$ м.

В результате расчетов, выясняем, что при возможности движения захвата по прямолинейной траектории, например, при сплошных рубках, расстояние, пройденное харвестерной головкой до дерева, назначенного в рубку, составит: $\bar{KPD} = 7,1$ м. (При $\bar{h}' = 1,1$ м, $Lz = 7$ м). Расстояние, пройденное при подтаскивании поваленного дерева к зоне раскряжевки, будет равно 9,4 м.

В то же время при выборочных рубках и наличии растущих деревьев в зоне прямолинейного движения манипулятора, расстояние, пройденное харвестерной головкой по криволинейной траектории до дерева, составит: $Ln = 9,3$ м (при $\bar{l} = 4,3$ м, $Lz' = 5$ м). Расстояние, пройденное харвестерной головкой при подтаскивании поваленного дерева, составит: $Ln = 10,4$ м.

Результаты расчета показывают, что в данном конкретном случае взаимного расположения объектов анализа на лесосеке, при наличии препятствий в зоне прямолинейного движения манипулятора, расстояние, проходимое харвестерной головкой от ее первоначального положения до дерева, увеличивается на 1,2 м (15 %), а расстояние подтаскивания дерева увеличивается на 1 м (11 %). При этом харвестер затрачивает дополнительное время на движение назад в ходе корректировки рабочей позиции, преодолевая расстояние $Dn' = 3,5$ м (при $Dn = 3,3$, $d = 0,2$ м).

Заключение. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о значительном влиянии наличия или отсутствия деревьев в зоне действия манипулятора на продолжительность их захвата и подтаскивания к харвестеру. Наличие деревьев нецелевого компонента в зоне работы манипулятора может увеличить время его работы на величину, достигающую 15 %. Кроме того, достижение максимальной сохранности остающихся деревьев требует дополнительных перемещений машины в ходе корректировки рабочих позиций при подтаскивании деревьев на выборочных рубках в густых насаждениях на расстояния до 3÷5 м. Учитывая необходимость частой корректировки рабочих позиций при выборочных рубках в густых древостоях эти значения приводят к увеличению общего расстояния перемещений харвестера по лесосеке на 30÷50 % в зависимости от вида рубок и являются одной из причин сокращения производительности техники. Это свидетельствует о том, что остающиеся на лесосеке деревья нецелевого компонента необходимо учитывать при моделировании производительности лесосечных машин в ходе расчета времени движения манипулятора на рабочих позициях при различиях в количественных показателях деревьев целевого компонента в общем составе древостоя на лесосеках.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компьютерная симуляция разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжечных машин / К.П. Рукомойников [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2(54). С. 108–113. DOI 10.18324/2077-5415-2022-2-108-113.
2. Макаренко А. В., Редькин А. К. Влияние технологических решений на условия и эффективность работы манипуляторных лесозаготовительных машин // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2014. Т. 18. № S2. С. 7–11. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21689512_91217477.pdf.



3. Мохирев А.П. Методика выбора лесозаготовительных машин под природно-климатические условия // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 4(24). С. 208-215. DOI 10.12737/23459.
4. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера / А. П. Мохирев [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2022. Т. 26. № 5. С. 93–101. DOI 10.18698/2542-1468-2022-5-93-101.
5. Рукомойников К.П. Имитационное моделирование взаимосогласованной работы комплектов адаптивно-модульных лесных машин // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2013. № 3. С. 154–158. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19057643_16110818.pdf
6. Рукомойников К. П., Купцова В. О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 3(375). С. 117–127. DOI 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127.
7. Системный анализ динамики работы харвестерной головки валочно-сучкорезно-раскряжевой машины (ХГ ВСРМ) / С. М. Базаров [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. № 235. С. 150–164. DOI 10.21266/2079-4304.2021.235.150-164.
8. Системный анализ технологической эффективности производства сортиментов на базе ВСРМ / С. М. Базаров [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. № 233. С. 177-188. DOI 10.21266/2079-4304.2020.233.177-188.
9. Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7. № 3(27). С. 307–314. DOI: 10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712.
10. Суханов Ю. В., Селиверстов А. А., Соколов А. П., Сюнев В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2012. № 8–2(129). С. 49-51. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18410602_11123025.pdf.
11. Хитров Е. Г., Григорьев Г. В., Дмитриева И. Н. Пример расчета производительности харвестера с учетом природно-производственных условий // Актуальные вопросы транспорта в лесном комплексе: материалы Всерос. науч.-практ. конф. СПб., 2020. С. 76–80. https://elibrary.ru/download/elibrary_42675615_28919503.pdf.
12. Computer modeling to support management and organizational decisions in the use of a forest harvester / K. P. Rukomojnikov et al. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Dushanbe, 2022. P. 122510P. DOI 10.1117/12.2631137.
13. Estimating and Modelling Harvester Productivity in Pine Stands of Different Ages, Densities and Thinning Intensities/ P. S. Mederski et al // Croat. j. for. eng., 2016;37(1):27–36.
14. Gerasimov Y., Sokolov A., Fjeld D. Improving cut-to-length operations management in Russian logging companies using a new decision support system// Baltic Forestry. 2013. Vol. 19. No. 1. P. 89–105.
15. Kellogg L. D., Bettinger P. Thinning productivity and cost for a mechanized cut-to-length system in the Northwest Pacific coast region of the USA // Journal of Forest Engineering. 1994;(5):43–54.
16. McNeel J. F., Rutherford D. Modelling Harvester-Forwarder System Performance in a Selection Harvest // Journal of Forest Engineering. 1994;6(1):7–14.
17. Nurminen T., Heikki K., Jori U. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-length Harvesting System // Silva Fennica. 2006;40(2):335–363. DOI: <https://doi.org/40.10.14214/sf>.
18. Rukomojnikov K. P., Vedernikov S. V., Kuptcova V. O. Modernization of harvesting and processing head // South-East European Forestry. 2019. Vol. 10. No. 2. P. 10. DOI 10.15177/SEEFOR.19–10.
19. Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests // Scandinavian Journal of Forest Research. 2012. Vol. 27. No. 1. P. 56–73. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>.
20. Yaoxiang Li. Modeling operational forestry problems in central Appalachian hardwood forests Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. 4166, 2005 <https://doi.org/10.33915/etd.4166> Access mode: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/4166>.

REFERENCES

1. Computer simulation of the development of cutting areas using felling-delimiting-crossing machines / K.P. Rukomoinikov et al. *Systems. Methods. Technologies.* 2022; 2(54):108–113. DOI 10.18324/2077-5415-2022-2-108-113.
2. Makarenko A.V., Redkin A.K. Influence of technological solutions on the conditions and efficiency of operation of manipulator logging machines. *Bulletin of the Moscow State Forest University. Forest Herald.* 2014;18(S2):7–11. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21689512_91217477.pdf.
3. Mokhirev A.P. Methodology for selecting logging machines for natural and climatic conditions. *Forestry Journal.* 2016;6;4(24):208–215. DOI 10.12737/23459.
4. Assessing the reliability of a logging harvester / A. P. Mokhirev et al. *Forestry Bulletin.* 2022;26(5):93–101. DOI 10.18698/2542-1468-2022-5-93-101.
5. Rukomoinikov K.P. Simulation modeling of mutually coordinated operation of sets of adaptive-modular forestry machines. *Bulletin of the Moscow State Forestry University. Forest Herald.* 2013;(3):154–158. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19057643_16110818.pdf



6. Rukomoinikov K. P., Kuptsova V. O. Justification of fuel consumption standards for multi-operational forestry machines using the example of a harvester. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Forest magazine*. 2020;3(375): 117–127. DOI 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127.
7. System analysis of the dynamics of the operation of the harvester head of a felling-delimiting-cross-cutting machine (HG VSRM) / S. M. Bazarov et al. *News of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2021;(235):150–164. DOI 10.21266/2079-4304.2021.235.150–164.
8. System analysis of the technological efficiency of production of assortments based on HSRM / S. M. Bazarov et al. *News of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2020;(233):177–188. DOI 10.21266/2079-4304.2020.233.177–188.
9. Sokolov A.P., Osipov E.V. Simulation modeling of the wood harvesting production process using Petri nets. *Forestry Journal*. 2017;7;3(27):307–314. DOI: 10.12737/article_59c2140d704ae5. 63513712.
10. Sukhanov Yu.V., Seliverstov A.A., Sokolov A.P., Syunev V.S. Simulation modeling of harvester operation: algorithms and implementation. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*. 2012;8-2(129):49–51. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18410602_11123025.pdf.
11. Khitrov E. G., Grigoriev G. V., Dmitrieva I. N. An example of calculating the productivity of a harvester taking into account natural production conditions. *Current Issues of Transport in the Forestry Complex*. St. Petersburg, 2020:76–80. https://elibrary.ru/download/elibrary_42675615_28919503.pdf.
12. Computer modeling to support management and organizational decisions in the use of a forest harvester / K. P. Rukomoinikov et al. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Dushanbe, 2022: 122510P. DOI 10.1117/12.2631137.
13. Estimating and Modeling Harvester Productivity in Pine Stands of Different Ages, Densities and Thinning Intensities / P. S. Mederski et al. *Croat. J. For. Eng.*, 2016;37(1):27–36.
14. Gerasimov Y., Sokolov A., Fjeld D. Improving cut-to-length operations management in Russian logging companies using a new decision support system. *Baltic Forestry*. 2013;19(1):89–105.
15. Kellogg L. D., Bettinger P. Thinning productivity and cost for a mechanized cut-to-length system in the Northwest Pacific coast region of the USA. *Journal of Forest Engineering*. 1994;(5):43–54.
16. McNeel J. F., Rutherford D. Modeling Harvester-Forwarder System Performance in a Selection Harvest. *Journal of Forest Engineering*. 1994;6(1):7–14.
17. Nurminen T., Heikki K., Jori U. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-length Harvesting System. *Silva Fennica*. 2006;40(2):335–363. DOI: <https://doi.org/40.10.14214/sf>.
18. Rukomoinikov K. P., Vedernikov S. V., Kuptsova V. O. Modernization of harvesting and processing head. *South-East European Forestry*. 2019;10(2):10. DOI 10.15177/SEEFOR.19–10.
19. Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2012;27(1):56–73. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>.
20. Yaoxiang Li. Modeling operational forestry problems in central Appalachian hardwood forests Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. 4166, 2005 <https://doi.org/10.33915/etd.4166> Access mode: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/4166>.

Статья поступила в редакцию 14.01.2024; одобрена после рецензирования 24.03.2024; принята к публикации 5.04.2024.
The article was submitted 14.01.2024; approved after reviewing 24.03.2024; accepted for publication 5.04.2024.

