

**Н.С. Королько, Ф.В. Свойкин, Г.Э. Рего, А.С. Королько, К.В. Россихин,
В.И. Кретинин**

ОПТИМАЛЬНАЯ СХЕМА РАЗРАБОТКИ ЛЕСОСЕКИ КАНАТНОЙ ТРЕЛЁВОЧНОЙ УСТАНОВКОЙ

Введение. В условиях затрудненности или невозможности применения традиционных решений для разработки лесосек в РФ в настоящее время по ряду причин [Кацадзе и др., 2022] альтернативные способы освоения лесных массивов [Свойкин и др., 2023; Svoikin et al., 2023; Svoikin et al., 2024a; Svoikin et al., 2024b] могут рассматриваться как один из способов стабилизации объемов заготовки древесины на таких территориях [Svoikin et al., 2024b].

В то же время неукоснительно реализуются цифровизация и диджитализация лесной промышленности в части вступления в силу с 1 января 2025 г. Федеральной государственной информационной системы лесного комплекса (ФГИС ЛК) – цифровой платформы, объединяющей в себе десятки государственных услуг в сфере лесных отношений. Трелевка, как основная технологическая операция, также подвергается цифровой трансформации. Подведены промежуточные итоги тестирования системы мониторинга лесной техники (в том числе для трелевки древесины) «ЭРА-ГЛОНАСС» для передачи во ФГИС Лесного комплекса информации о передвижении лесовозной, лесозаготовительной, а также лесопожарной и иной техники. Пилотный проект, проходящий в Архангельской и Ульяновской областях, организован Рослесхозом совместно с Минпромторгом России и акционерным обществом «ГЛОНАСС». В результате эксперимента были получены сведения об устойчивой передаче данных из «ЭРА-ГЛОНАСС» во ФГИС ЛК, т. е. интеграция систем успешно реализуется. После отработки механизмов интеграции данных о передвижении лесозаготовительной и иной техники в двух регионах РФ полученный опыт будет транслироваться по всей стране (ФГИС ЛК – национальная система). Следующим этапом является оснащение лесной техники датчиками, что позволит повысить прозрачность заготовки древесины на всех этапах.

Уже сформирован научный задел по применению канатных трелевочных установок новой конструкции в современных актуальных

природно-производственных условиях арендной базы лесозаготовителя РФ [Кацадзе и др., 2020; Svoynkin et al., 2020; Svoynkin et al., 2024c; Svoynkin et al., 2024d].

В частном случае задача построения маршрута канатной дороги является построением схемы разработки лесосеки и технологической задачей. В РФ технологическая карта является основным общепринятым разрешительным документом, регламентирующим работу лесозаготовителя на лесосеке¹. При составлении такого документа помимо описания непосредственно технологического процесса и применяемого оборудования особое внимание уделяется лесоводственным требованиям, а именно сохранению подроста, семенных куртин и т. д.² Этот фактор существенно влияет на размещение погрузочных пунктов и волоков.

Цель работы. В целях создания оптимального маршрута необходимо максимально исключить неопределённость в расположении препятствий, что позволит применять иные, невероятностные математические методы решения [Джонс, 2011; Пантелеев, Летова, 2015]. Для решения данной задачи достаточно определить координаты в местной системе координат, что возможно сделать дистанционно на основании материалов космоснимков.

Еще одной проблемой, которую необходимо решать, помимо поиска минимального покрывающего дерева является минимизация числа поворотных опор, которые требуется поставить для осуществления транспортировки. В таком виде эта задача похожа на задачу поиска непересекающихся путей с минимальным общим числом отрезков [Rego, Voronov, 2020; Svoynkin et al., 2024a]. Важным отличием нашей задачи от классической постановки является ограничение на длину отрезков, которое задается через максимально допустимое расстояние между двумя поворотными опорами.

Методика исследования. В случае применения классической канатной трелевочной установки волока имеют прямолинейную форму и

¹ Приказ Минприроды России №23 от 17.01.2022 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки»

² Приказ Минприроды России №993 от 01.12.2020 «Об утверждении Правил заготовки древесины и особенностей заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации (с изменениями на 17 октября 2022 года)»

используется только веерная схема разработки лесосеки, что исключает выполнение выборочных рубок и работу на участках сложной формы, поскольку некоторые зоны остаются недоступными. Веерная схема разработки лесосеки сложной формы смоделирована и приведена на рис. 1.

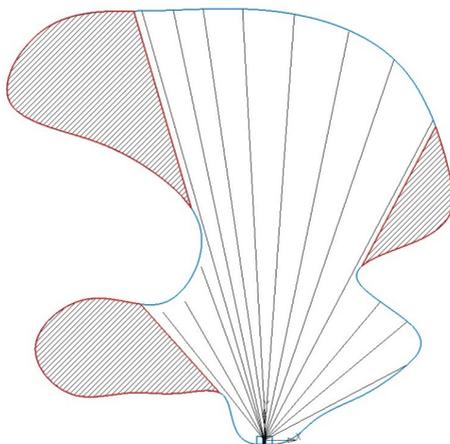


Рис. 1. Веерная схема разработки лесосеки сложной формы

Fig. 1. A fan scheme for the development of a complex-shaped cutting area

В случае применения разработанной авторами канатной трелёвочной установки новой конструкции с поворотом трассы в плане возникает необходимость проектирования волоков иной трассировки, в том числе выбора расположения и формы волоков с учётом равномерного захвата и разработки всей площади лесосеки и обхода возникающих препятствий. При этом монтаж промежуточных и поворотных опор общепринято является высокочрезвычайно затратной операцией. Для канатной трелёвки данная монтажная операция в разы превышает разницу в стоимости перемещения по прямой и поворота колёсной техники. Таким образом, расположение поворотных точек должно обеспечивать минимальное их число и минимальное число перестановок. Определение места расположения волока может основываться на экспертном заключении специалиста (лица, принимающего решение), осуществляющего проектирование, однако ввиду большого количества вариантов данный метод может сильно отличаться от оптимального. Данная задача похожа на задачу поиска минимального

покрывающего дерева непересекающимися путями [Rego et al., 2021]. При этом каждый путь строится независимо, минимизируется общее число поворотных опор. При составлении схемы разработки лесосеки всегда известны её внешние границы с установленной Правилами отвода и таксации лесосек точностью. Очевидно, что при любом способе отвода лесосек (круговые площадки, сплошной/ленточный перече́т) координаты каждого дерева не устанавливаются. В таком случае задача является наиболее сложной, поскольку из таксационных характеристик о запасе, среднем объеме хлыста по породе и полноте можно вычислить среднее расстояние между деревьями, при этом само их расположение остаётся неизвестным.

Формализуем постановку задачи с помощью математической нотации. Рассмотрим многоугольник A , внутри которого необходимо построить путь от начальной точки к множеству целевых точек, избегая препятствий и минимизируя общую длину пути и количество поворотных опор.

При этом зададим множество объектов:

• Границы области A зададим формулой (1) как множество последовательно соединенных вершин:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}; \quad (1)$$

• Стартовая точка s (погрузочная площадка) расположена на границе или внутри области A ;

• Множество целевых точек зададим по формуле (2) и будем подразумевать, что они находятся внутри области A :

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}; \quad (2)$$

• Множество препятствий обозначим как:

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_k\}. \quad (3)$$

Каждое препятствие o_i представлено как окружность с центром (x_i, y_i) и радиусом r_i . Искомые пути между s и G не должны иметь общих точек с O ;

• Множество поворотных опор определим как:

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_{end}\}. \quad (4)$$

К множеству объектов необходимы к введению следующие ограничения:

1. Избегание препятствий. Каждый из искомых путей не пересекает ни одно препятствие, o принадлежит O ;

2. Пребывание внутри области A . Каждый из искомым путей полностью лежит внутри или на границе A ;

3. Максимальное расстояние между поворотными опорами не превышает некоторое заданное число d , определяемое по формуле (5):

$$d(b_k, b_{k+1}) \leq d_{\max}, \quad \forall k = 1, \dots, \text{end} - 1; \quad (5)$$

4. Задано расчетное минимальное число поворотных опор, которое соответствует выражению:

$$|B|_{\min} = \frac{d(s, g_j)}{d_{\max}} \forall j; \quad (6)$$

5. Минимальный радиус кривизны $R(b_k)$ на поворотах не должен быть менее некоторого заданного числа по неравенству (7) и связан с углом поворота β_k и расстоянием между опорами:

$$R(b_k) \geq R_{\min} \quad \forall k = 1, \dots, \text{end} - 1; \quad (7)$$

6. Парные пересечения между путями недопустимы:

$$\forall i, j \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad i \neq j, \quad P_{s, g_i} \cap P_{s, g_j} = \emptyset, \quad (8)$$

где P_{s, g_i} и P_{s, g_j} – траектории путей от s до g_i и от s до g_j соответственно.

В ходе расчетов необходимо минимизировать функцию стоимости (9) с учетом общего числа поворотных опор, угла поворота на опоре, общей длины пути, коэффициентов весов, отражающих важность соответствующих компонентов:

$$F(s, g_j) = k_1 \times (|B| - |B|_{\min}) + k_2 \times \sum_{k=1}^{|B|} \beta_k + k_3 \times L(s, g_j), \quad (9)$$

где $|B|$ – общее число поворотных опор; β_k – угол поворота на опоре b_k ; $L(s, g_j)$ – общая длина пути от s до g_j ; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты весов, отражающие важность соответствующих компонентов, $k_1 + k_2 + k_3 = 1$, $k_1, k_2, k_3 \geq 0$.

Помимо этого, для алгоритма потребуются обозначения для изменения положения поворотных опор: δb_k – вектор изменения положения на опоре b_k , ограниченный максимальной величиной Δ_{\max} ; $\delta \beta_k$ – изменение угла поворота на опоре b_k , ограниченное β_{\max} .

В ходе дальнейших преобразований строится алгоритм оптимального маршрута канатной дороги при помощи графа видимости.

Для построения алгоритма необходимы следующие входные данные: стартовая точка (s), множество целевых точек (G), множество препятствий (O) (деревья и границы полигона).

При этом должны учитываться параметры модели, т. е. максимальное расстояние между опорами (d_{\max}), минимальный радиус кривизны (R_{\min}), максимальное изменение позиции опоры (Δ_{\max}), максимальный угол поворота (β_{\max}).

Для работы алгоритма требуется инициализировать множество узлов и добавить дискретизированные точки вокруг препятствия. Указано в выражении (10):

$$V \leftarrow \{s\} \cup G. \quad (10)$$

Инициализируется множество рёбер ($E \leftarrow \emptyset$), при этом необходимо добавить ребро (v_i, v_j) в E , чтобы получить граф видимости $G_{\text{visibility}} = (V, E)$. Также стоит инициализировать множество путей ($P \leftarrow \emptyset$) для нахождения кратчайшего пути (p_g) от s до g в графе $G_{\text{visibility}}$ и добавить p_g в P . Инициализируются текущее состояние путей $P_{\text{current}} \leftarrow P$ и лучшее состояние путей $P_{\text{best}} \leftarrow P$. Для генерации нового состояния P_{new} путём изменения одной опоры в случайном пути задается начальная температура T . Затем выбираются случайный путь $p \in P_{\text{current}}$ и случайная опора b_k в пути p . Изменяется позиция опоры согласно формуле (11):

$$b'_k = b_k + \delta b_k, \quad (11)$$

где $|\delta b_k| \leq \Delta_{\max}$.

Проверяется изменение угла поворота ($\delta\beta_k$), которое не превышает β_{\max} . Обновляется путь (p) с новой опорой (b'_k). Затем вычисляется изменение целевой функции (12):

$$\Delta = F(P_{\text{new}}) - F(P_{\text{current}}). \quad (12)$$

Исходя из этого, принимается новое состояние $P_{\text{current}} \leftarrow P_{\text{new}}$, обновляется лучшее состояние $P_{\text{best}} \leftarrow P_{\text{current}}$ и температура $T \leftarrow T \times \alpha$, где $0 < \alpha < 1$ – коэффициент охлаждения. Инициализируется общая стоимость $F \leftarrow 0$, после чего вычисляется стоимость пути $f(p)$ как сумма штрафов:

- за количество опор по формуле (13):

$$k_1 \times (n_{\text{supports}} - n_{\min}); \quad (13)$$

- за углы поворота по формуле (14):

$$k_2 \times \sum |\beta_i|; \quad (14)$$

- за длину пути по формуле (15):

$$k_3 \times L(p); \quad (15)$$

Следующим этапом стоит обновить общую стоимость по формуле (16):

$$F \leftarrow F + f(p) \quad (16)$$

и проверить, что длина сегмента $\leq d_{\max}$, а радиус кривизны $\geq R_{\min}$. После проверяется непересекаемость пути и препятствия, а также проводится проверка того, что пути p_i и p_j не пересекаются.

В результате данных действий, получаются оптимизированные непересекающиеся пути P_{best} от стартовой точки s к целевым точкам G .

К вышеуказанному алгоритму поиска маршрута требуется пояснение, которое представлено далее.

Такой инструмент, как граф видимости, широко используется в вычислительной геометрии и помогает найти все возможные пути, избегая препятствий, что является основой для последующей оптимизации целевой функции. Для оптимизации пути можно использовать метод отжига или другие алгоритмы оптимизации для нахождения глобального минимума функции стоимости. Начальная температура T выбирается исходя из начальной оценки стоимости. Коэффициент охлаждения α определяет скорость снижения температуры. Функция вероятности $y(T)$ обычно определяется по формуле (17):

$$y(T) = \exp\left(\frac{-\Delta F}{T}\right), \quad (17)$$

где ΔF – разница в стоимости между новым и текущим решениями.

Помимо этого, на каждой итерации оптимизации первоначального решения постоянно проверяется соблюдение ограничений по радиусу кривизны, максимальному расстоянию между опорами и отсутствию пересечений с препятствиями. При этом алгоритм поиска маршрута канатной дороги выполняется за конечное время и, если существует решение, обязательно его найдёт.

Для доказательства конечности работы алгоритма докажем конечность всех его составляющих. Множество узлов графа ($G_{\text{visibility}}$) конечно, так как оно состоит из:

1. Стартовой точки s ;
2. Конечное число целевых точек определяется по уравнению (18):

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}; \quad (18)$$

3. Конечного числа дополнительных узлов, добавленных вокруг препятствий и внутри многоугольника;

4. Рёбра графа E также конечны, поскольку они соединяют конечное множество узлов.

В качестве вспомогательного в предложенном алгоритме можно использовать любой известный алгоритм поиска пути на графе. Например, это может быть алгоритм Дейкстры, который гарантированно завершается за конечное число шагов, так как граф конечен и не имеет отрицательных весов. В качестве второго вспомогательного алгоритма используется алгоритм имитации отжига. Максимальное число итераций k_{max} алгоритма задаётся заранее и является конечным.

На каждой итерации алгоритма имитации отжига производится конечное число операций: выбор случайного пути, модификация одной опоры, проверка выполнения ограничений и оценка нового состояния.

Таким образом, алгоритм отжига гарантированно завершится после k_{max} итераций. Из конечности всех составных частей следует, что алгоритм поиска маршрута канатной дороги является конечным.

Теперь докажем, что алгоритм поиска маршрута канатной дороги находит допустимое решение, при условии, что оно существует. Алгоритм строит граф, содержащий все возможные пути, удовлетворяющие основным геометрическим ограничениям (видимость, отсутствие пересечения с препятствиями). При поиске начальных путей алгоритм находит кратчайшие пути в этом графе, если они существуют. Оптимизация путей не ухудшает их достижимость, а лишь улучшает параметры в рамках заданных ограничений. Проверка на отсутствие пересечений между путями и повторная оптимизация обеспечивают допустимость найденных путей.

Таким образом, поскольку каждый этап алгоритма завершается за конечное число шагов и алгоритм исчерпывает все возможные комбинации в заданном конечном пространстве, он является конечным. Если существует решение (т. е. пути, удовлетворяющие всем ограничениям), алгоритм его найдёт в процессе перебора допустимых состояний. Следовательно, алгоритм гарантированно завершится и найдёт решение, если таковое существует.

Для оценки сложности алгоритма необходимо проанализировать каждый его этап и определить их временную и пространственную сложность в зависимости от входных данных, рассмотреть генерацию узлов графа, количество узлов графа (N), которое зависит от многих вариативных факторов:

• Общее число заданных точек (стартовая точка и целевые точки) вычисляется по формуле (19):

$$n_s = m + 1, \quad (19)$$

где m – число целевых точек;

• Точки вокруг препятствий. Если вокруг каждого из c препятствий добавляется z точек, то общее число таких точек определяется по формуле (20):

$$n_t = c \cdot z; \quad (20)$$

• Квадратная сетка внутри многоугольника. При использовании сетки размером $n_x \cdot n_y$, общее число точек соответствует значению из формулы (21):

$$n_g = n_x \cdot n_y; \quad (21)$$

На основании этих компонентов вычисляется общее число узлов графа:

$$N = n_s + n_t + n_g \quad (22)$$

и генерируются ребра графа. В худшем случае граф является полным, и число возможных рёбер E между узлами графа определяется как:

$$E = \frac{N \cdot (N - 1)}{2}. \quad (23)$$

Однако на практике число рёбер значительно меньше вследствие ограничений. Рёбра добавляются только между узлами, которые видимы друг для друга (нет препятствий между ними). Рёбра должны находиться внутри многоугольника.

Далее рассматривается сложность проверки пересечения рёбер с препятствиями. Для каждого потенциального ребра необходимо проверить, пересекает ли оно какие-либо препятствия. При наличии c препятствий время на проверку одного ребра составляет $O(c)$. Следовательно, общая временная сложность построения графа составляет:

$$O(E \cdot c) = O(N^2 \cdot c). \quad (24)$$

Пространственную сложность для хранения графа можно вычислить как:

$$O(N) \cdot O(E). \quad (25)$$

Для поиска кратчайших путей от стартовой точки к каждой из целевых точек используется алгоритм Дейкстры. Его временная сложность равна

$$O(E + N \log N). \quad (26)$$

Поскольку

$$E = O(N^2), \quad (27)$$

то временная сложность этапа поиска начальных путей составляет:

$$O(N^2 + \text{Mlog}N) = O(N^2). \quad (28)$$

Оптимизация путей выполняется методом имитации отжига, при этом все пути оптимизируются одновременно. Обозначим максимальное число итераций как I (параметр k_{\max} в алгоритме). В каждой итерации выполняются следующие действия:

- Выбор случайного пути и опоры для изменения $O(1)$;
- Время проверки ограничений пути пропорционально длине пути L ;
- Проверка пересечения с препятствиями:

$$O(C \cdot L) \quad (29)$$

(проверка каждого сегмента пути с препятствиями);

- Проверка пересечений с другими путями:

$$O(|P| \cdot L^2), \quad (30)$$

где $|P|$ – число путей.

Общая временная сложность оптимизации равна:

$$O(I \cdot (1 + L + c \cdot L + |P| \cdot L^2)) = O(I \cdot (c \cdot L + |P| \cdot L^2)). \quad (31)$$

Поскольку c , $|P|$ и L обычно меньше N , основными факторами здесь являются число итераций I и квадратичная зависимость от длины пути L при проверке пересечений между путями.

Общая временная сложность состоит из:

- построения графа:

$$(O(N^2 \cdot c)); \quad (32)$$

- поиска начальных путей:

$$(O(N^2 + \text{Mlog}N)); \quad (33)$$

- оптимизации путей:

$$(O(I \cdot (c \cdot L + |P| \cdot L^2))). \quad (34)$$

Таким образом, общая временная сложность равна:

$$O(N^2 \cdot c + N^2 + \text{Mlog}N + I \cdot (c \cdot L + |P| \cdot L^2)).$$

Общая пространственная сложность состоит из объема памяти хранения графа, определяемого по формуле (35):

$$(O(N + E) = O(N^2)), \quad (35)$$

и объема хранения путей, определяемого по формуле (36):

$$(O(|P| \cdot L)). \quad (36)$$

Алгоритм имеет полиномиальную сложность, которая в худшем случае квадратично зависит от числа узлов и числа препятствий. На практике этап оптимизации может быть вычислительно затратным при большом числе итераций и длинных путях.

Геометрически поворотную опору мы будем представлять в виде точки на пути. Каждая опора b_k характеризуется углом поворота β_k , который может быть равен 0.

Результаты исследования. Для проверки работоспособности алгоритма был выбран опытный участок, находящийся в выделе 1 квартала 4 Приморского участкового лесничества Курортного лесничества Санкт-Петербурга, Северо-Западный федеральный округ, Российская Федерация. Обоснование выбора и отвода участка – наиболее типичные природно-производственные условия арендной базы предприятий для осуществления канатной трелёвки при помощи канатных трелевочных установок.

На основании оцифрованных материалов космоснимков и планшетов в инженерно-программном комплексе SOLIDWORKS premium 2021 sp1.0 получены координаты границ лесного участка, а также координаты препятствий (деревьев, не подлежащих вырубке). Фрагмент оцифрованных материалов космоснимков и планшетов приведен на рис. 2.

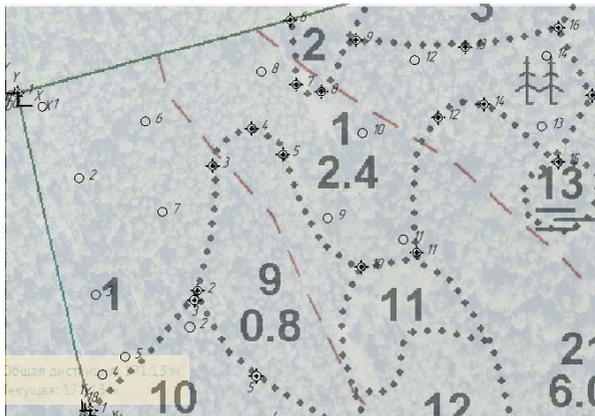


Рис. 2. Фрагмент оцифрованных материалов космоснимков и планшетов

Fig. 2. A fragment of digitized materials from satellite images and tablets

Непрямолинейная форма лесосеки, приведенной на рис. 2, является распространенной в отрасли и подразумевает нелинейный (неклассический) подход к трассировке волоков, отличный от существующих на практике подходов к параллельной трассировке волоков.

Для решения задачи исходя из критерия технологической целесообразности выбраны местоположение погрузочного пункта и конечные точки волоков. В результате применения алгоритма создана оптимальная схема расположения волоков, приведенная на рис. 3.

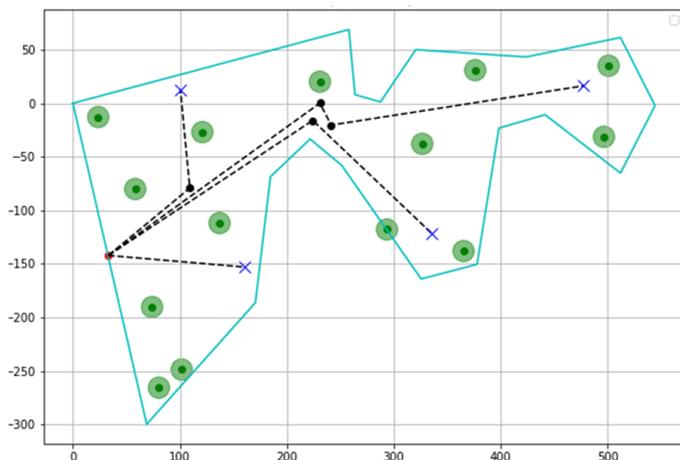


Рис. 3. Оптимальная схема разработки лесосеки

Fig. 3. The optimal scheme for the development of a cutting area

Из рис. 3 следует конкретный маршрут трассировки волоков, который может быть наложен на технологическую карту лицом, принимающим решение, и применен для разработки лесосеки подобной непрямолинейной формы и конфигурации в том числе в дальнейшем при работе с правоустанавливающим документом (вместо лесной декларации) в Федеральной государственной информационной системе лесного комплекса с 1 января 2025 г.

Заключение. В ходе исследования был разработан и испытан алгоритм поиска оптимальных маршрутов расположения трасс волоков канатной дороги, учитывающий технические ограничения канатных установок, такие как максимальное расстояние между опорами и

минимальный радиус кривизны. Алгоритм основан на построении графа видимости и использовании метода имитации отжига для оптимизации путей с учётом заданных ограничений. Проведённый эксперимент показал работоспособность алгоритма и его способность находить пути в реальных условиях.

В лесозаготовительной промышленности алгоритм может применяться для проектирования волоков при любой системе машин. Содействие лесоинженеру в проектировании лесосек позволит повысить производительность с учетом работы в ФГИС лесного комплекса с 1 января 2025 г., снизить количество несоответствий работ технологической карте. Также подобные алгоритмы могут найти свою применимость в робототехнике, например, для задачи планирования пути в условиях ограниченной видимости. Дальнейшая работа будет строиться в направлении программного поиска конечных точек волоков путём адаптации алгоритма для покрытия многоугольника минимальным корневым деревом с ограничением на длину узлов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях / пер. с англ. Осипов А.И. М.: ДМК Пресс, 2011. 312 с.

Кацадзе В.А., Бирман А.Р., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Угрюмов С.А., Королько Н.С., Шошин А.О. Результаты экспериментальных исследований использования КТУ для первичной вывозки древесины на переувлажненных лесосеках в Республике Беларусь // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 8. С. 32–36. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-8-32-36

Кацадзе В.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Угрюмов С.А. Обзор современных отечественных решений для транспортного освоения труднодоступных лесосек // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 3. С. 3–12. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-3-3-12

Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: учебное пособие. 4-е изд., испр. СПб.: Лань, 2015. 512 с.

Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Соколова В.А., Войнаш С.А., Арико С.Е. Применение канатно-рельсовых дорог для трелевки сортиментов // Лесной журнал. 2023. №5. С. 115–125. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-115-125

Rego G.E., Grigoreva O.I., Voronov R.V. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Т. 806, no. 1. Art. no. 012025.

Rego G., Voronov R. On Algorithms for the Minimum Link Disjoint Paths Problem // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2020. P. 525–529.

Svoykin F., Sokolova V., Korolko N., Shoshin A. Constructive solutions to improve cable haulers for development of hard-to-reach cutting areas // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 193. Art. no. 01048. DOI:10.1051/e3sconf/202019301048

Svoykin F., Zhuk K., Svoynkin V., Iniesta D.V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations Using Machine-Learning Methods // Inventions. 2023. Vol. 8, iss. 2. Art. no. 57. DOI: 10.3390/inventions8020057

Svoykin F.V., Zhuk K.D., Svoynkin V.F., Kretinin V.I., Uglova L.A. Modern domestic solutions and software for Scandinavian logging in Russia under the new economic conditions // BIO Web of Conferences. 2024a. Vol. 84. Art. no. 01012. DOI:10.1051/bioconf/20248401012

Svoykin F.V., Svoynkin V.F., Rossikhin K.V., Borozna A.A., Taraban M.V., Maksimov P.P., Kovtun M.A. Modernization of skidding and primary removal of wood in the Vologda Region through the use of relevant domestic solutions // E3S Web of Conferences. 2024b. Vol. 515. Art. no. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202451503022

Svoykin F., Svoynkin V., Borozna A., Taraban M., Shavelkin D. Modernization of cable skidding by finding the boundary conditions // E3S Web of Conferences. 2024c. Vol. 515. Art. no. 02017.

Svoykin F.V., Korolko N.S., Korolko A.S., Borozna A.A., Sorokin K.E. Construction of a cable yarding track by mathematical and software methods // E3S Web of Conferences. 2024d. Vol. 515. Art. no. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202451501013

References

Jones M.T. Programming artificial intelligence in applications / transl. from English by Osipov A.I. Moscow: DMK Press, 2011. 312 p. (In Russ.)

Katsadze V.A., Birman A.R., Svoynkin F.V., Svoynkin V.F., Ugryumov S.A., Korolko N.S., Shoshin A.O. Results of experimental studies of the use of CTU for primary removal of wood from waterlogged cutting areas in the Republic of Belarus. *Repair. Recovery. Modernization*, 2020, no. 8, pp. 32–36. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-8-32-36 (In Russ.)

Katsadze V.A., Svoynkin F.V., Svoynkin V.F., Ugryumov S.A. Review of modern domestic solutions for transport development of hard-to-reach cutting areas. *Repair. Recovery. Modernization*, 2022, no. 3, pp. 3–12. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-3-3-12 (In Russ.)

Panteleev A.V., Letova T.A. Optimization methods in examples and problems: textbook. 4th ed., rev. St. Petersburg: Lan', 2015. 512 p. (In Russ.)

Rego G.E., Grigoreva O.I., Voronov R.V. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, T. 806, no. 1, art. no. 012025.

Rego G., Voronov R. On Algorithms for the Minimum Link Disjoint Paths Problem. *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2020, pp. 525–529.

Svoykin F., Sokolova V., Korolko N., Shoshin A. Constructive solutions to improve cable haulers for development of hard-to-reach cutting areas. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 193, art. no. 01048. DOI:10.1051/e3sconf/202019301048

Svoykin F.V., Svoikin V.F., Sokolova V.A., Voinash S.A., Ariko S.Ye. Application of Cable-Railways for Timber Skidding. *Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 115–125. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-115-125 (In Russ.)

Svoykin F., Zhuk K., Svoikin V., Iniesta D.V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations Using Machine-Learning Methods. *Inventions*, 2023, vol. 8, iss. 2, art. no. 57. DOI: 10.3390/inventions8020057

Svoykin F.V., Zhuk K.D., Svoikin V.F., Kretinin V.I., Uglova L.A. Modern domestic solutions and software for Scandinavian logging in Russia under the new economic conditions. *BIO Web of Conferences*, 2024a, vol. 84, art. no. 01012. DOI:10.1051/bioconf/20248401012

Svoykin F.V., Svoikin V.F., Rossikhin K.V., Borozna A.A., Taraban M.V., Maksimov P.P., Kovtun M.A. Modernization of skidding and primary removal of wood in the Vologda Region through the use of relevant domestic solutions. *E3S Web of Conferences*, 2024b, vol. 515, art. no. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202451503022

Svoykin F., Svoikin V., Borozna A., Taraban M., Shavelkin D. Modernization of cable skidding by finding the boundary conditions. *E3S Web of Conferences*, 2024c, vol. 515, art. no. 02017.

Svoykin F.V., Korolko N.S., Korolko A.S., Borozna A.A., Sorokin K.E. Construction of a cable yarding track by mathematical and software methods. *E3S Web of Conferences*, 2024d, vol. 515, art. no. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202451501013

Материал поступил в редакцию 29.10.2024

Королько Н.С., Свойкин Ф.В., Рего Г.Э., Королько А.С., Россихин К.В., Кретинин В.И. Оптимальная схема разработки лесосеки канатной трелёвочной установкой // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 314–334. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.317-334

В статье был предложен и апробирован алгоритм поиска оптимальных маршрутов расположения трасс волоков канатной дороги при разработке лесосеки канатными трелевочными установками, учитывающий технические ограничения канатных трелевочных установок, такие как максимальное расстояние между

опорами и минимальный радиус кривизны. Алгоритм основан на построении графа видимости и использовании метода имитации отжига для оптимизации путей с учётом заданных ограничений. Приведенный практический пример показал работоспособность алгоритма и его способность находить пути в реальных условиях. В лесозаготовительной промышленности алгоритм может применяться для проектирования волоков при любой системе лесных машин. Содействие лесоинженеру в проектировании лесосек позволит повысить производительность, снизить количество несоответствий работ технологической карте.

Ключевые слова: трелевка, оптимальный маршрут, канатные трелевочные установки, трассировка волоков, опора, граф видимости, алгоритм.

Korolko N.S., Svoikin F.V., Rego G.E., Korolko A.S., Rossikhin K.V., Kretinin V.I. Optimal scheme for developing a cutting area using a rope skidding installation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 314–334 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.317-334

In the article, an algorithm was proposed and tested to find the optimal routes for the location of cable car trails when developing a cutting area with rope skidding installations, taking into account the technical limitations of rope skidding installations, such as the maximum distance between supports and the minimum radius of curvature. The algorithm is based on the construction of a visibility graph and the use of an annealing simulation method to optimize paths taking into account specified constraints. The given practical example showed the efficiency of the algorithm and its ability to find ways in real conditions. In the logging industry, the algorithm can be used to design hauls for any system of forest machines. Assistance to the forest engineer in the design of cutting areas will increase productivity, reduce the number of inconsistencies with the technological map.

Key words: skidding, optimal route, rope skidding installations, tracing of drags, support, visibility graph, algorithm.

КОРОЛЬКО Николай Сергеевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kns89lta@mail.ru

KOROLKO Nikolay S. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: kns89lta@mail.ru

СВОЙКИН Федор Владимирович – доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 8938-6910. ResearcherID: AAC-4074-2020. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: svoykin_fv@mail.ru

SVOYKIN Fedor V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Technologies of Logging Industries, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8938-6910. ResearcherID: AAC-4074-2020. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: svoykin_fv@mail.ru

РЕГО Григорий Эйнович – доцент кафедры прикладной математики и кибернетики Петрозаводского государственного университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 1286-7507. ResearcherID: AFX-5848-2022. ORCID: [0000-0002-2235-8113](https://orcid.org/0000-0002-2235-8113).

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия. E-mail: regoGr@yandex.ru

REGO Grigorij E. – PhD (Technical), Associate Professor at the Department of Applied Mathematics and Cybernetics, Petrozavodsk State University. SPIN-code: 1286-7507. ResearcherID: AFX-5848-2022. ORCID: [0000-0002-2235-8113](https://orcid.org/0000-0002-2235-8113).

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Republic of Karelia. Russia. Email: regoGr@yandex.ru

КОРОЛЬКО Александр Сергеевич – инженер-технолог Федерального государственного унитарного предприятия «ГосНИИПП».

191167, наб. Обводного канала, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: korolko2008@mail.ru

KOROLKO Alexander S. – Engineer-Technologist, Federal State Unitary enterprise “GosNIIPP”.

191167. Obvodny canal emb. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: korolko2008@mail.ru

РОССИХИН Кирилл Вадимович – магистрант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: krossihin@gmail.com

ROSSIKHIN Kirill V. – Master’s Degree student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institutsky per. 5, Let. U. St. Petersburg, Russia. E-mail: krossihin@gmail.com

КРЕТИНИН Виктор Иванович – доцент кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 4424-8046. ORCID: 0000-0003-0467-4080.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: KVI_1960@mail.ru

KRETININ Viktor I. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Control in Technical Systems, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4424-8046. ORCID: 0000-0003-0467-4080.

194021, Institutsky per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: KVI_1960@mail.ru