

Ф.В. Свойкин, Н.С. Королько, С.А. Угрюмов, К.В. Россихин

ПОСТРОЕНИЕ ТРАССЫ КАНАТНОЙ ДОРОГИ МАТЕМАТИЧЕСКИ-ПРОГРАММНЫМИ МЕТОДАМИ

Введение. В условиях новой экономической реальности традиционные методы лесозаготовок, основанные на использовании многооперационных лесозаготовительных машин, работающих по скандинавской сортиментной технологии, становятся менее эффективными или даже неприменимыми по ряду причин [Svoikin F., Zhuk, Svoikin V., Ugryumov, Bacherikov, Iniesta, Ryarukhin, 2023]. Отмечается, что отечественные разработки в области снегоболотоходной техники, применяемой в других секторах сырьевой промышленности, могут представлять собой альтернативу. Однако в настоящее время производственные мощности компаний, специализирующихся на снегоболотоходах, сосредоточены на удовлетворении потребностей нефтегазовой отрасли [Кацадзе, Свойкин Ф., Свойкин В., Угрюмов, 2022].

С учетом потребностей отрасли в простых и экономичных решениях, требующих минимальной квалификации персонала, канатная трелёвка становится одним из наиболее перспективных методов транспортировки древесины на труднодоступных лесосеках [Svoikin F., Svoikin V., Sokolova, Voinash, Ariko, 2023]. Она дополняет канатно-рельсовые и узкоколейные железные дороги, предоставляя эффективное решение для таких сложных природно-производственных условий арендной базы лесопользователей РФ [Katsadze, Birman, Svoikin F., Korolko, Ugryumov, 2019; Svoikin F., Sokolova, Lokshtanov, 2020; Svoikin F., Korolko N., Korolko A., Borozna and Sorokin, 2024; Кацадзе, Бирман, Свойкин Ф., Свойкин В., Угрюмов, Королько, Шошин, 2020]. При этом, монтаж канатной трелёвки оказывается одной из наиболее трудоёмких операций. При сплошных рубках применяется веерный метод разработки лесосеки для минимализации перемещения основной установки.

При использовании канатной-трелевочной установки усовершенствованного типа, с шарнирно-сочленённой кареткой [Svoikin V., Svoikin F., Vokhmyanin, Zotenko, Alekseeva, 2021; Svoikin F., Sokolova, Korolko N. and Shoshin, 2020; Свойкин В., Королько Н., Свойкин В., Угрюмов, Кретинин,

Тарабан, 2022], благодаря возможности совершения поворотов возникает возможность разработки лесосек сложной (непрямолинейной) формы, в том числе предназначенных для выборочной (селективной) рубки. В таком случае возникает необходимость выбора направления волоков, их длины и количества.

Цель работы. Построение оптимального маршрута представляет собой сложную задачу из-за неопределенности, связанной с вероятностями различных физических состояний информационного поля, т. е. уникальном распределении древостоя на каждом лесном участке ввиду сложности и неоднородности как рельефа местности, так лесных насаждений в совокупности с почвенно-грунтовыми условиями. Для решения этой многофакторной задачи с использованием программных методов требуется разработать математическую модель, которая определит оптимальный путь от точки *A* (местоположение КТУ «начальное») через промежуточные поворотные опоры, охватывающие необходимые зоны разработки участка, и заканчивающийся в точке *B* (местоположение конечной опоры или местоположения КТУ «конечное»).

При построении маршрута в условиях риска и неопределенности принятия решений лицом, принимающим решение (ЛПР), при наличии сложных природно-производственных условий задача существенно усложняется. Поэтому для её решения необходимо обратиться к современным исследованиям математиков в данном направлении.

Математические методы универсальны, однако для их применения необходимо корректно поставить задачу, для чего необходим учёт специфических особенностей изучаемой лесной экосистемы как сложного биогеоценоза.

Постановка такой многофакторной задачи является существенным и ответственным этапом, влияющим на выбор метода решения, такой метод можно разделить на несколько последовательных стадий:

1. Установление границы подлежащей оптимизации системы, т. е. представление системы в виде некоторой изолированной части реального мира. В настоящей работе исследованию подлежит система в виде рабочего пространства участка леса, назначенного и отведенного в рубку. В него также могут включаться необходимые логистические подъездные пути. Лесосека может быть изначально разбита на пасеки, в пределах которых и будет рассматриваться прокладка и трассировка маршрута. Ввиду технической возможности осуществления поворотов, наиболее рационально использовать комплексный подход программными методами, благодаря которым возможно создать всю схему разработки такой лесосеки.

2. Определение показателя эффективности, на основе которого можно оценить характеристики системы. В случае прокладки трасс КТУ показателем эффективности является трудоёмкость прокладки трассы.

3. Выбор внутрисистемных независимых переменных, которые должны адекватно описывать условия функционирования системы, т. е. максимально приблизить модель к реальному процессу путём учёта дополнительных функций ограничения. Применимость такой модели в конечном итоге будет выявлена практикой.

4. Построение модели, которая описывает взаимосвязи между переменными задачи и отражает влияние независимых переменных на значение показателя эффективности. Процесс построения системы является самым трудоёмким и требует четкого понимания специфических особенностей рассматриваемой системы.

К практическим целям реализации построенной модели стоит отнести создание и доработку экспериментальной модели КТУ с целью описания процесса поиска оптимальных размерно-качественных характеристик каретки и поворотного башмака.

Методика исследования. Существует несколько методов для решения оптимизационных задач, но не все из них подходят для выбора оптимального маршрута. Один из наиболее универсальных и понятных – метод полного перебора. Однако его применимость ограничена задачами целочисленного программирования с небольшим количеством переменных и строгими граничными условиями. В практических задачах этот метод редко используется [Андреев, Герасимов, 1999].

Для выбора метода решения необходимо описать характерные особенности задачи прокладки оптимальной трассы КТУ:

1. Задача представляет из себя n -шаговый процесс принятия решений.

2. Определена для любого числа шагов и имеет независимую от них структуру.

3. Заданы параметры, описывающие состояние оптимальности системы, независимые от числа шагов.

Для решения задач с названными особенностями применим метод динамического программирования [Нильсон, 1973].

Опишем алгоритм решения задач методом динамического программирования:

1. Выбираем параметры, характеризующие состояние s управляемой системы перед каждым шагом.

2. Разбиваем операцию на шаги.

3. Определяем набор шаговых управлений u_i для каждого шага и налагаемые на них ограничения.

4. Определяем, какой выигрыш носит на i шаге управления u_i , если перед этим система была в состоянии s , т. е. записываем функцию выигрыша:

$$W_i = f_i(s, u_i). \quad (1)$$

5. Определяем, как изменится состояние s системы S под влиянием управления u_i на i шаге – она переходит в новое состояние:

$$s' = \varphi_i(s, u_i). \quad (2)$$

6. Записываем основное рекуррентное уравнение динамического программирования, выражающее условный оптимальный выигрыш:

$$W_i(s) = \max(f_i(s, u_i) + W_{i+1}(\varphi_i(s, u_i))). \quad (3)$$

7. Производим условную оптимизацию последнего m шага, задавая множеством состояний s , из которых можно за один шаг прийти до конечного состояния, вычисляя для каждого из них условный оптимальный выигрыш $Wm(s) = \max(f_m(s, u_i))$, и находим условное оптимальное управление $u_m(s)$, для которого этот максимум достигается.

8. Производим условную оптимизацию $(m - 1)$ шага по п.6 алгоритма, полагая в ней $i = (m - 1), (m - 2), \dots$ и для каждого из этих шагов указываем условное оптимальное управление $u_i(s)$, при котором достигается максимум функции. На первом шаге состояние системы не варьируется:

$$W^* = W_1(s_0). \quad (4)$$

9. Производим безусловную оптимизацию управления, считывая соответствующие рекомендации на каждом шаге: берем найденное оптимально управление на первом шаге $u_1^* = u_1(s_0)$; изменяем состояние системы по 6-му шагу; для вновь найденного состояния находим оптимальное управление на втором шаге u_2^* и т. д. до конца процесса.

Существует альтернативный метод перебора. Алгоритм A^* – алгоритм упорядоченного перебора, в котором используется оценочная функция

$$\hat{f}(n) = \hat{g}(n) + \hat{h}(n), \quad (5)$$

где \hat{h} – эвристическая функция; $g(n) = k(s, n)$ – стоимость оптимального пути из начальной вершины s до некоторой произвольной вершины n .

Для оценки оптимальности принимаем факт, что каждый путь имеет стоимость, достижение минимальной стоимости в заданных условиях

будет являться критерием оптимальности, т. е. $f(n)$ – стоимость оптимального пути, при условии, что он проходит через вершину n . Сумма действительной стоимости оптимального пути от вершины n до какой-нибудь из целевых вершин. Нижней границей стоимости пути из точки S в конечную точку N является прямая. При использовании алгоритма A^* , когда процесс поиска достигает некоторой вершины, то оказывается, что оптимальный путь к ней уже найден.

При применении вероятностного метода математического моделирования первым этапом получения оптимального решения является:

– Установление границы подлежащей оптимизации системы – т. е. из лесного массива выделяем отдельный участок, лесосеку, на которой требуется решить задачу поиска оптимального маршрута. Кроме того, на лесосеке с разными характеристиками древостоя по плотности, необходимо выделить изомерные участки.

– Определение показателя эффективности, т. е. выявление характеристики системы на основе которого можно выявить наилучший проект или множество наилучших условий функционирования системы. В случае определения трассы канатной дороги наиболее верным технологическим фактором будет минимальная сумма углов поворотов трассы, что обеспечит максимальную скорость прохождения и устойчивость каретки КТУ.

Для соблюдения ограничений, вызванных необходимостью соблюдения ширины трассы, следует осуществить закладывание половины необходимой ширины трассы в диаметр деревьев (препятствий), которые необходимо обойти.

Естественное распределение деревьев подчиняется закону Пуассона. Среднее расстояние между деревьями является производной полноты лесного массива [Коробов, 2010; Scott and Edwin, 1991; Svoykin F., Svoykin V., Zagidullin, Latypova, Sokolova, Garbuzova, 2024; Dallas, 1991; Hedin, 1996; Svoykin F., Zhuk, Svoykin V., Borozna, Taraban, Kretinin, Uglova, 2024]:

$$P_n(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda), \quad (6)$$

где k – число событий (число встреч); λ – параметр распределения,

$$\lambda = \frac{l}{l_{\text{cp}}}. \quad (7)$$

Для преобразования лесного массива в математический вид необходимо создать из участка сетчатую структуру, с условно равномерным рас-

пределением деревьев, при которой среднее расстояние между деревьями $l_{\text{ср}}$ является диаметром вписанной окружности. Для создания изотропной системы точки пересечения окружностей соединяются в трёх/шести угольники, получая сотовую модель, представленную на рис. 1.

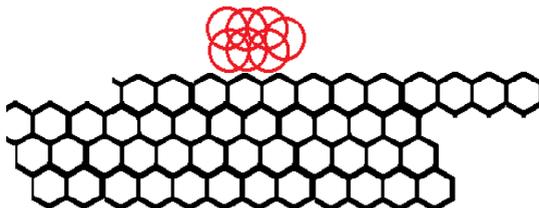


Рис. 1. Сотовая модель ячеек

Fig. 1. Cellular cell model

При неравномерном распределении деревьев по лесосеке применяется деление её на кластеры. В каждом кластере определяется среднее расстояние между деревьями, так как это расстояние является размером ячейки для определенного числа встреч.

В случае удаления части деревьев в ходе выборочной или санитарной рубки, среднее расстояние между деревьями будет пропорционально увеличиваться в зависимости от интенсивности рубки.

Примером этого метода может служить лесосека квартала (квадрата) 4 в Приморском участковом лесничестве Курортного лесничества (Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Курортный лесопарк», находящееся в ведении Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга). Этот лесной массив относится к категории защитных городских лесов. В данном случае планируется проведение санитарно-оздоровительных мероприятий в форме выборочной санитарной рубки. Учитывая криволинейные границы участка, совпадающие с границами выдела, а также сильную заболоченность участка, предположим невозможность применения колёсной техники; в таком случае наиболее эффективным вариантом является использование канатной трелевочной установки с возможностью маневрирования.

Выдел 39 квартала 4 Приморского участкового лесничества Курортного лесничества обладает следующими таксационными характеристиками: площадь S – 4,5 га; породный состав лесных насаждений: 6Е2Ос2Б+С; тип леса: КС; возраст, лет: 90, 75, 75, 70; бонитет, класс: 1; полнота: 0,6; запас древесины на 1 гектаре, средний: 311 м³; средний диаметр, см: Е – 32; С, Б – 28, Ос – 36.

Общий вид лесосеки после обработки картографических данных и данных аэрофотосъемки с выделением деревьев, подлежащих рубке (треугольник) и остающихся (окружность), приведён на рис. 2.

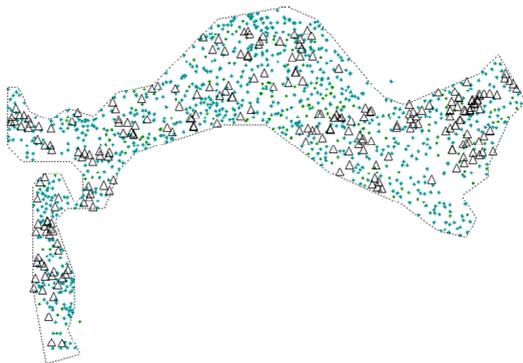


Рис. 2. Общий вид лесосеки
Fig. 2. General view of the cutting area

Для создания кластерной модели лесосеки необходимо определить базовый размер ячеек, т. е. l_{cp} , которое рассчитывается из площади выдела и количества деревьев.

Число деревьев N , шт., определяется по формуле

$$N = \frac{Z}{V_{d_{cp}}}, \quad (8)$$

где N – число деревьев, шт.; Z – запас, m^3 ; $V_{d_{cp}}$ – объем одного дерева средней толщины, m^3 .

В результате расчетов по формуле (8) получаем объем, V_d , m^3 , по породам: Б₂₈ – 0,68 m^3 ; С₂₈ – 0,68 m^3 ; Е₃₂ – 0,96 m^3 ; Ос₃₆ – 1,16 m^3 .

В результате вычислений получаем значение N :

$$N = \frac{311}{0,6 \cdot 0,96 + 0,2 \cdot 1,16 + 0,2 \cdot 0,68} = 327 \text{ шт./га.}$$

Среднее расстояние между деревьях при однородном распределении деревьев по выделу

$$L_{cp} = \frac{S}{N}. \quad (9)$$

В результате вычислений получаем значение l_{cp} :

$$l_{cp} = \sqrt{\frac{10\,000}{327}} = 5,53 \text{ м.}$$

При проведении выборочной или санитарной выборочной рубки средней интенсивности 33% среднее расстояние между деревьями пропорционально увеличится $5,53 \times 1,33 = 7,36$. Для демонстрации методики будем использовать величину среднего расстояния.

На основании формул закона распределения деревьев (6,7) осуществляется построение диаграммы вероятностей числа встреч с препятствиями (деревьями) на различных расстояниях при фиксированном значении среднего расстояния ($l_{cp} = 5,53$ м), представленный на рис. 3.

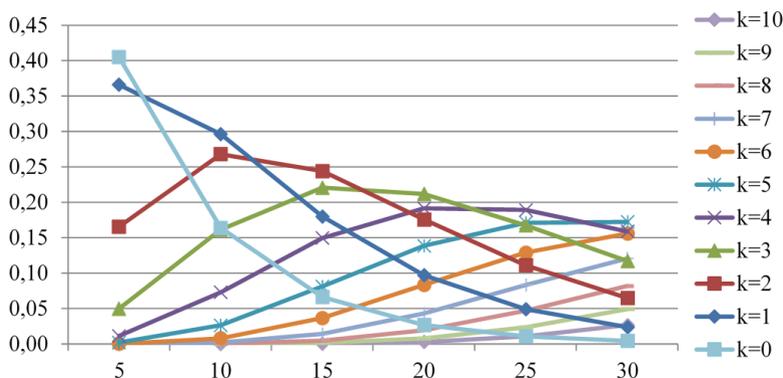


Рис. 3. Диаграммы вероятностей числа встреч с препятствиями (деревьями) на различных расстояниях при фиксированном значении среднего расстояния ($l_{cp} = 5,53$ м)

Fig. 3. Probability diagrams of the number of encounters with obstacles (trees) at various distances at a fixed value of the average distance ($l_{cp} = 5,53$ m)

На рис. 3 ось x – протяженность прямолинейного участка, м; ось y – вероятность (p) встречи k препятствий.

Данными для графика является табл. 1 зависимости вероятностей числа встреч с препятствиями (деревьями) от различных расстояний при фиксированном значении среднего расстояния ($l_{cp} = 5,53$ м).

Таблица 1

Вероятности числа встреч с препятствиями (деревьями) на различных расстояниях при фиксированном значении среднего расстояния ($l_{cp} = 5,53$ м)

Probabilities of the number of encounters with obstacles (trees) at different distances at a fixed value of the average distance

Вероятность	Расстояние между препятствиями, м					
	5	10	15	20	25	30
$P_n(k) k = 0$	0,405	0,164	0,066	0,027	0,011	0,004
$P_n(k) k = 1$	0,366	0,296	0,180	0,097	0,049	0,024
$P_n(k) k = 2$	0,165	0,268	0,244	0,176	0,111	0,065
$P_n(k) k = 3$	0,050	0,162	0,221	0,212	0,168	0,117
$P_n(k) k = 4$	0,011	0,073	0,150	0,192	0,189	0,159
$P_n(k) k = 5$	0,002	0,026	0,081	0,139	0,171	0,172
$P_n(k) k = 6$	0,000	0,008	0,037	0,084	0,129	0,156
$P_n(k) k = 7$	0,000	0,002	0,014	0,043	0,083	0,121
$P_n(k) k = 8$	0,000	0,000	0,005	0,020	0,047	0,082
$P_n(k) k = 9$	0,000	0,000	0,001	0,008	0,024	0,049
$P_n(k) k = 10$	0,000	0,000	0,000	0,003	0,011	0,027

Исходя из анализа диаграмм следует, что при каждом допустимом значении числа встреч ($k = 0, 1, 2, \dots$) существуют пиковые значения вероятностей таких встреч. После достижения экстремума функции график стремится к минимальным значениям. Однако данный факт не является определяющим для принятия решения о выборе максимального расстояния прямой при любых значениях k . Так, например, максимальное значение вероятности $p(4) = 0,19$ достигается при расстоянии в 25 м. Дальнейшее уменьшение значений вероятности встреч относится к значению $k = 4$, в то время как, значения вероятностей встреч с $k > 4$ продолжают расти. Следовательно, практические значения имеют значения левых частей графиков до достижения максимума.

Устанавливая максимально допустимое число встреч $k = 10$, необходимо определить вероятности встречи $P_n(k) < 10$. Расчёт значений в табл. 2 производится исходя из выражения суммы вероятностей событий $n \leq k \leq 10$ при $0 \leq n \leq 10$.

$$P_n(0 \leq k \leq 10) = \sum_n^{10} p_n - p_n! \quad (10)$$

Таблица 2

Вероятности наличия числа препятствий, превышающие допустимые значения k

The probability of the presence of a number of obstacles exceeding the permissible values k

Вероятность	Расстояние между препятствиями, м					
	5	10	15	20	25	30
$P_n(k) 0 \leq k \leq 10$	1,000	1,000	1,000	0,999	0,993	0,977
$P_n(k) 1 \leq k \leq 10$	0,595	0,836	0,934	0,972	0,982	0,972
$P_n(k) 2 \leq k \leq 10$	0,229	0,540	0,753	0,875	0,933	0,949
$P_n(k) 3 \leq k \leq 10$	0,064	0,272	0,509	0,699	0,822	0,884
$P_n(k) 4 \leq k \leq 10$	0,014	0,110	0,289	0,487	0,654	0,766
$P_n(k) 5 \leq k \leq 10$	0,002	0,037	0,139	0,295	0,465	0,607
$P_n(k) 6 \leq k \leq 10$	0,000	0,011	0,058	0,157	0,294	0,435
$P_n(k) 7 \leq k \leq 10$	0,000	0,003	0,021	0,073	0,165	0,279
$P_n(k) 8 \leq k \leq 10$	0,000	0,001	0,007	0,030	0,081	0,158
$P_n(k) 9 \leq k \leq 10$	0,000	0,000	0,002	0,011	0,034	0,075

Суммарная вероятность встречи P_n ($n \leq k \leq 10$) приведена на рис. 4.

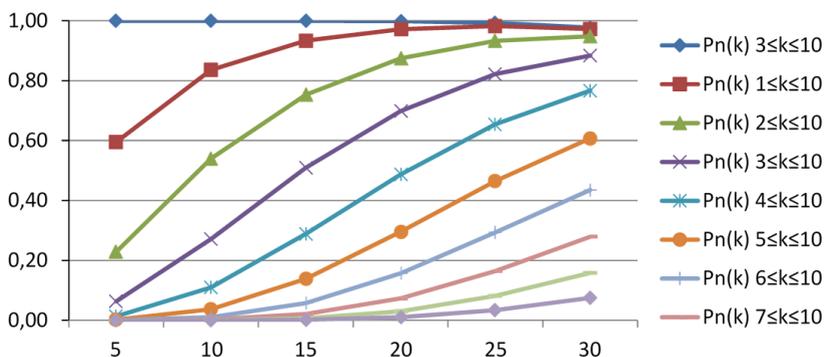


Рис. 4. Суммарная вероятность встречи P_n ($n \leq k \leq 10$)

Fig. 4. The total probability of meeting P_n ($n \leq k \leq 10$)

Особенно важно применение моделей для изучения процессов в канатных трелевочных установках (КТУ). Проведение экспериментов на реальных установках связано с высокими затратами и временными издержками на подготовку и получение результатов.

Проведение опытов в реальных условиях, особенно в области динамики канатов, несет определенные риски для обслуживающего персонала. Кроме того, климатические факторы иногда мешают проведению таких опытов.

В ходе ранних исследований был создан трехмерный макет канатных трелевочных установках (КТУ) с поворотом трассы в плоскости. Для оценки работоспособности этого изделия была разработана динамическая модель на электротяге, используя RC-модели и 3D-печать.

Результаты исследования. Из анализа данных следует, что с увеличением расстояния вероятность n встреч также возрастает. Для определения оптимального расстояния необходимо учесть заданную допустимую вероятность и предельное число встреч.

Число встреч при прокладке маршрута будет соответствовать количеству поворотов.

В результате произведённых действий общий вид лесосеки, на которой происходит построение маршрута, примет вид, указанный на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид лесосеки при допустимости 1 встречи
Fig. 5. General view of the cutting area with a probability of 1 meeting

При увеличении допустимого числа встреч размеры ячеек, по границам которого будет происходить построение трассы, будет увеличиваться, что демонстрируется рис. 6 (а – вероятность встречи 1 дерева, b – вероятность встречи 2 деревьев) и 7 (вероятность встречи 3 деревьев).

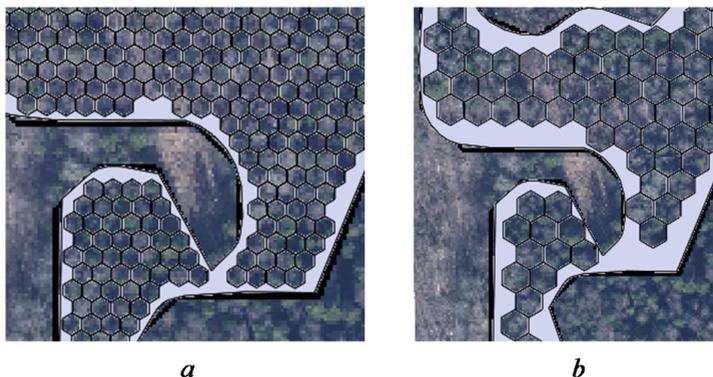


Рис. 6. *a* – вероятность встречи 1 дерева; *b* – вероятность встречи 2 деревьев
Fig. 6. *a* – the probability of meeting 1 tree; *b* – The probability of meeting 2 tree



Рис. 7. Вероятность встречи 3 деревьев
Fig. 7. The probability of meeting 3 tree

На рис. 6 и 7 вид лесосеки с разбивкой на ячеистые структуры при условии изменения допустимого числа встреч и сохранении их вероятности.

Для практической реализации разрабатываемой модели и реализации теоретических основ с практическими рекомендациями, выполнено описание стенда для исследования модели шарнирно-сочленённой каретки

с поворотным башмаком. Согласно современным представлениям, элементы КТУ состоят из следующих элементов:

- опора,
- несущий канат,
- промежуточная опора,
- каретка,
- тяговый канат.

С учетом критериев энергоэффективности и металлоемкости, при проектировании современных моделей была предложена конструкция стенда на рис. 8.

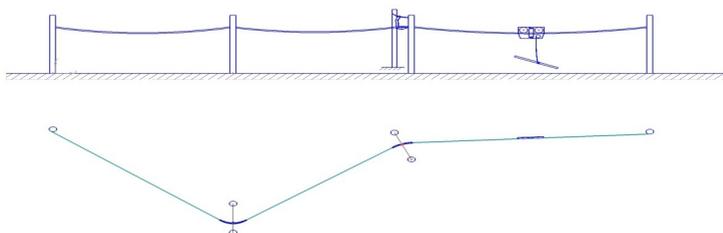


Рис. 8. Стенд экспериментальной модели канатно-трелевочной установки
Fig. 8. The stand of the experimental model of the cable-skidding installation

Стенд представляет собой комплекс из концевой и промежуточной опор, несущего каната, поворотного башмака и каретки.

Для обеспечения простоты и компактности конструкции, опоры стенда выполнены из дерева и имеют высоту 0,3 м. Они установлены на площадках размером 0,3×0,3 м. Расстояние между опорами составляет 700 мм и может быть изменено при необходимости.

Исходная модель каретки является статичной конструкцией. Однако с учетом концепции поворота на трассе канатных трелевочных установках (КТУ) требуется, чтобы каретка представляла собой автономную конструкцию. Это означает исключение других тросов, помимо несущего каната, чтобы избежать усложнения поворотной опоры, ее монтажа и эксплуатации, а также рисков переплетения и обрыва. Кроме того, это предполагает наличие стационарной КТУ с синхронизированными барабанами. Базовая модель представлена на рис. 9.

В ходе проведения пробного эксперимента выявлены недостатки конструкции корпуса каретки, препятствующие прохождению поворотного башмака, на основании чего на данном этапе сделаны изменения форме корпуса в части сужения частей пластины, мешающие повороту.

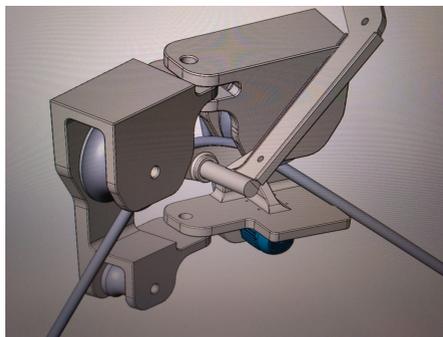


Рис. 9. Базовый макет шарнирно-сочлененной каретки
Fig. 9. The basic layout of an articulated carriage

Такая модернизация получила название шарнирно-сочлененная каретка (ШСК), приводимая в движение двумя гидромоторами, питающимися от гидронасоса, через распределитель с электронным приводом управления. Гидронасос приводится в действие двигателем внутреннего сгорания. Разгон, торможение, фиксация производится дистанционно управлением распределителем. Подтягивание каретки груза, также осуществляется собственным гидромотором, через полиспасть. Виртуальная модель создана в инженерном программном комплексе SolidWorks. Далее детали модели адаптированы для 3D печати. В итоге получена функционирующая модель каретки, которая показана на рис. 10.

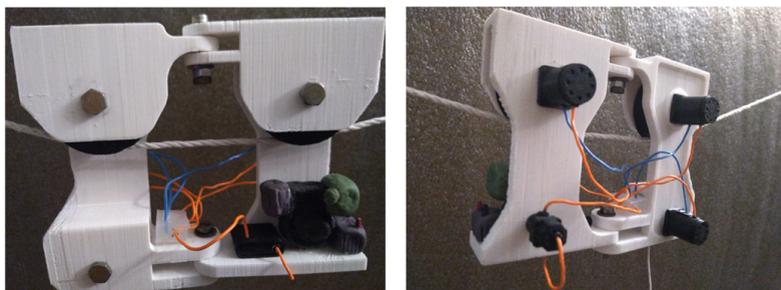


Рис. 10. Функциональная модель моторизованной шарнирно-поворотной каретки
Fig. 10. Functional model of a motorized swivel carriage

Данная модель помогла получить представление о работе будущей установки. Самым рискованным этапом процесса трелёвки является прохождение каретки через промежуточную опору. Теоретически, она

может быть любого радиуса. Однако для изучения этого процесса в динамике нам потребовалась движущаяся модель.

Для решения проблемы создания динамической модели произведена оценка унификации комплектующих. Принято решение об использовании опыта RC моделирования (радио моделирование RC – radio control). В качестве имитации гидромоторов были предложены электродвигатели моделей лебёдок. Для управления была использована аппаратура управления Flysky.

В целях адаптации имеющегося макета к выбранным элементам в корпусе модели были спроектированы, и изготовлены посадочные места для двигателей, антенны. Дополнительно запроектированы и созданы фиксаторы двигателя, позволяющие производить замену приводных колёс.

На движущейся модели осуществлен эксперимент по преодолению поворотной опоры. В ходе эксперимента выявлены недостатки, в виде смещения центра тяжести и недостаточной тяги, вызванной слабым трением между приводными валами и тросом.

Для балансировки каретки на стороне смещения установлены свинцовые балансировочные грузики. В целях увеличения сил трения изменена форма паза ролика от овального в конусообразный, работающий по принципу клинового ремня.

Указанная модернизация позволила увеличить показатели проходимости каретки по тросу. Однако стабильность прохождения поворотов и подъемов провиса троса недостаточна для признания ситуации приемлемой.

В рамках совершенствования модели произведены работы по замене моторов на электродвигатели, которые позволяют двигаться с большей скоростью.

Заключение. Описываемый процесс при встрече с деревьями в процессе прокладки маршрута носит случайный характер, т. е. по своим характеристикам относится к Марковским процессам.

Задача оптимизации стоит в поиске суммарно наилучшего маршрута и выборе числа допустимой встречаемости с препятствиями на каждом однородном участке. Поскольку фактическое распределение деревьев на участке не является однородным, а носит кластерный характер, то при проектировании прохождения трассы КТУ (при $P = \text{const}$) по предварительно нанесенных трассах, соответствующей однородной модели каждого участка, необходимо учитывать различие длин «невстречаемости».

На дальнейших этапах решения задачи, применяя методы марковских процессов динамического программирования, будет получена методика расчета и результаты моделирования в виде вариантов оптимального маршрута прокладки волоков.

Стоит отметить, что в данном исследовании на актуальном этапе работ пока не проводились оценки статических и динамических воздействий при прохождении поворота трассы каретки, однако она будет осуществлена в дальнейшем путем установки динамометра на оттяжку.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе. Йоэсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу. 1999. 200 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

Коробов П.Н. Математическое программирование и моделирование экономических процессов: учебник. Изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: ООО «Издательство ДНК», 2010. 376 с. (Классическое образование).

Нильсон Н. Искусственный интеллект: методы поиска решений / пер. с англ. В.Л. Стефанюка; под ред. С.В. Фомина. М.: Мир, 1973. С. 70–80»

Свойкин Ф.В., Королько Н.С., Свойкин В.Ф., Угрюмов С.А., Кретинин В.И., Тарабан М.В. Усовершенствование канатной трелевочной установки путем модернизации каретки // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 8. С. 3–8. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-8-3-8

Dallas C.H. The monocable conveyer system for thinning operations. COFE Symposium, Forestry Operations in the 1990's: Challenges and Solutions. Nanaimo. British Columbia, Canada. 1991. P. 89–91.

Hedin I.B. Shelterwood harvesting with a skyline system in a coastal second-growth forest. Forest Engineering Research Institute of Canada, Wood Harvesting Technical Note No. TN 243. 2601 East Mall, Vancouver, British Columbia, V6T 1Z4, Canada. 1996.

Katsadze V.A., Birman A.R., Svoikin F.V., Korolko N.S., Ugryumov S.A. Modernization of Rope Skidding Installations in the Development of Inaccessible Logging

Areas // Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya = Repairs. Recovery. Modernization. 2019. No. 6. P. 8–11. URL: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-6-8-11>

Scott C.I. and Edwin S.M. The monocable conveyer system for thinning operations. COFE Symposium: Forestry Operations in the 1990's. Challenges and Solutions. Nanaimo, British Columbia, Canada, 1991. P. 111–114.

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov, S., Bacherikov, I., Iniesta, D.V., Rya-pukhin, A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations // Using Machine-Learning Methods Inventions. 2023. 8(2). P. 57. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions8020057>

Svoikin V., Svoikin F., Vokhmyanin N., Zotenko S., Alekseeva S. Modernization of the cable skidding system by upgrading the articulated carriage // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. 876(1). 012074. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012074

Svoikin F.V., Korolko N.S., Korolko A.S., Borozna A.A. and Sorokin K.E. Construction of a cable yarding track by mathematical and software methods // E3S Web of Conferences. 2024. 515. 01013. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451501013>

Svoikin F., Sokolova V., Korolko N. and Shoshin A. Constructive solutions to improve cable haulers for development of hard-to-reach cutting areas // E3S Web of Conferences. 2020. 193. 01048. ICMTMTE 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202019301048

Svoikin F., Svoikin V., Zagidullin R., Latypova E., Sokolova V., Garbuzova T. On the question of the possibility of carrying out land-scape forestry works // E3S Web of Conferences. 2024/ 480. 02021. DOI: 10.1051/e3sconf/202448002021

Svoikin F.V., Sokolova V.A., Lokshtanov B.M. On the Issue of Perspective Direction of Development and Analysis of Development of Hard-to-reach Overwatered Forest Areas with the Help of Rope Skidders in the Northwestern Federal District of the Russian Federation // Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies. 2020. Iss. 2(46). P. 87–93. URL: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-2-87-93>

Svoikin F.V., Svoikin V.F., Sokolova V.A., Voinash S.A., Ariko S.Ye. Application of Cable-Railways for Timber Skidding // Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal. 2023. No. 5. P. 115–125. URL: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-115-125>

Svoikin F.V., Zhuk K.D., Svoikin V.F., Borozna A.A., Taraban M.V., Kretinin V.I., Uglova L.A. Modern domestic solutions and soft-ware for Scandinavian logging in Russia under the new economic conditions // BIO Web of Conferences. 2024. 84, 01012. DOI: 10.1051/bioconf/20248401012

References

Andreev V.N., Gerasimov Yu.Yu. Making optimal decisions: theory and application in the forestry complex. Joensuu: Joensuu University Press. 1999. 200 p. (In Russ.)

Dallas C.H. The monocable conveyer system for thinning operations. COFE Symposium, Forestry Operations in the 1990's: Challenges and Solutions. Nanaimo. British Columbia, Canada. 1991, pp. 89–91.

Hedin I.B. Shelterwood harvesting with a skyline system in a coastal second-growth forest. Forest Engineering Research Institute of Canada, Wood Harvesting Technical Note No. TN 243. 2601 East Mall, Vancouver, British Columbia, V6T 1Z4, Canada. 1996.

Katsadze V.A., Birman A.R., Svoikin F.V., Svoikin 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., Birman A.R., Svoikin F.V., Korolko N.S., Ugryumov S.A. Modernization of Rope Skidding Installations in the Development of Inaccessible Logging Areas. *Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya = Repairs. Recovery. Modernization*, 2019, no. 6, pp. 8–11. URL: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-6-8-11>. (In Russ.)

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

Korobov P.N. Mathematical programming and modeling of economic processes. Textbook. Ed. third rev. and additional. St. Petersburg: DNA Publishing House LLC, 2010. 376 p. (Classical education). (In Russ.)

Nilsson N. Artificial intelligence: methods for finding solutions = Problem-solving Methods in Artificial Intelligence / Transl. from English V.L. Stefanyuk; edited by S.V. Fomina. M.: Mir, 1973, pp. 70–80. (In Russ.)

Scott C.I. and Edwin S.M. The monocable conveyer system for thinning operations. *COFE Symposium: Forestry Operations in the 1990's. Challenges and Solutions*. Nanaimo, British Columbia, Canada. 1991, pp. 111–114.

Svoikin V., Svoikin F., Vokhmyanin N., Zotenko S., Alekseeva S. Modernization of the cable skidding system by upgrading the articulated carriage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 876(1), 012074. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012074

Svoikin F., Zhuk K., Svoikin V., Ugryumov S., Bacherikov I., Iniesta D.V., Ryapukhin A. Classification of Tree Species in the Process of Timber-Harvesting Operations. *Using Machine-Learning Methods Inventions*, 2023, 8(2), 57. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions8020057>

Svoikin F.V., Korolko N.S., Korolko A.S., Borozna A.A. and Sorokin K.E. Construction of a cable yarding track by mathematical and software methods. *E3S Web of Conferences*, 2024, 515, 01013. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451501013>

Svoikin F., Sokolova V., Korolko N. and Shoshin A. Constructive solutions to improve cable haulers for development of hard-to-reach cutting areas. *E3S Web of Conferences*, 2020, 193, 01048. ICMTMTE 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202019301048

Svoykin F., Svoikin V., Zagidullin R., Latypova E., Sokolova V., Garbuzova T. On the question of the possibility of carrying out land-scape forestry works. *E3S Web of Conferences*, 2024, 480, 02021. DOI: 10.1051/e3sconf/202448002021

Svoykin F.V., Korolko N.S., Svoikin V.F., Ugryumov S.A., Kretinin V.I., Taraban M.V. Improvement of the rope skidding installation by modernizing the carriage. *Repair. Recovery. Modernization*, 2022, no. 8, pp. 3–8. DOI: 10.31044/1684-2561-2022-0-8-3-8

Svoykin F.V., Sokolova V.A., Lokshtanov B.M. On the Issue of Perspective Direction of Development and Analysis of Development of Hard-to-reach Overwatered Forest Areas with the Help of Rope Skidders in the Northwestern Federal District of the Russian Federation. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2020, iss. 2(46), pp. 87–93. URL: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-2-87-93>. (In Russ.)

Svoykin F.V., Svoikin V.F., Sokolova V.A., Voinash S.A., Ariko S.Ye. Application of Cable-Railways for Timber Skidding. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 115–125. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-115-125>. (In Russ.)

Svoykin F.V., Zhuk K.D., Svoikin V.F., Borozna A.A., Taraban M.V., Kretinin V.I., Uglova L.A. Modern domestic solutions and soft-ware for Scandinavian logging in Russia under the new economic conditions. *BIO Web of Conferences*, 2024, 84, 01012. DOI: 10.1051/bioconf/20248401012

Материал поступил в редакцию 22.05.2024

Свойкин Ф.В., Угрюмов С.А., Королько Н.С., Россихин К.В. Построение трассы канатной дороги математически-программными методами // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 252–272. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.252-272

Приведены сдерживающие факторы для развития традиционных решений для освоения труднодоступных лесосек. Предложены математически-программные методы расчёты построения трасс для канатно-трелевочных установок. Предложены способы решения задачи прокладки приемлемого оптимального маршрута с применением методов дискретного программирования в условиях риска и неопределённости. На практическом примере в типичных природно-производственных условиях СЗФО РФ (кв.4 в. 39 Приморского участкового лесничества Курортного лесничества г. Санкт-Петербурга) производится построение математической модели для решения стохастической задачи с квантильными показателями.

Ключевые слова: канатные трелевочные установки, каретка, трасса, план, лесосека, программно-математические методы, квантильные показатели.

Svoikin F.V., Ugryumov S.A., Korolkov N.S., Rossikhin K.V. Construction of a cable car route using mathematical and software methods. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoi Akademii*, 2024, iss. 250, pp. 252–272 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.252-272

Limiting factors for the development of traditional solutions for the development of hard-to-reach logging sites are presented. Mathematical and software methods have been proposed for calculating the construction of routes for rope-skidding installations. Methods are proposed for solving the problem of laying out an acceptable optimal route using discrete programming methods under conditions of risk and uncertainty. Using a practical example in typical natural production conditions of the Northwestern Federal District of the Russian Federation (quarter 4, century 39 of the Primorsky district forestry of the Kurortny forestry of St. Petersburg), a mathematical model is built to solve a stochastic problem with quantile indicators.

Key words: rope skidding installations, carriage, route, plan, cutting area, software and mathematical methods, quantile indicators.

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: svoikin_fv@mail.ru

SVOIKIN Fedor V. – PhD (Technical), Associate Professor 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: svoikin_fv@mail.ru

УГРЮМОВ Сергей Алексеевич – и.о. зав. каф. технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>.

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

UGRYUMOV Sergey A. – DSc (Technical), Acting Head Department Technologies of logging production at the St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirova, Doctor of Technical Sciences. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>.

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

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 of St. Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institutsky per. 5, Let. U. St. Petersburg, Russia. E-mail: kns89lta@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 of St. Petersburg State Forest Technical University.

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