

ЗАКОН АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДВИЖЕНИЯ ТРЕЛЕВОЧНОЙ МАШИНЫ ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

Клубничкин В.Е.

*Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Мытищи, Россия*

THE LAW OF AUTOMATED MOVEMENT OF A SKIDDING MACHINE ALONG A GIVEN TRAJECTORY

Klubnichkin V.E.

*Mytishchi branch of N.E. Bauman Moscow State Technical University,
Mytishchi, Russia*

Аннотация: Представлен закон автоматизированного движения трелевочной машины, обеспечивающий энергоэффективную и безопасную трелевку пачки деревьев по заданной траектории без участия оператора. Закон описывает алгоритм управления поворотом машины, учитывающий ее габариты, длину пачки и геометрию волока для предотвращения выезда за его пределы. Траектория движения задается последовательностью точек и корректируется в реальном времени на основе данных спутникового позиционирования и систем распознавания окружающей обстановки.

Abstract: The law of automated movement of a skidding machine is presented, which ensures energy-efficient and safe skidding of a stack of trees along a given trajectory without operator involvement. The law describes an algorithm for controlling the rotation of a machine, taking into account its dimensions, the length of the bundle and the geometry of the portage to prevent it from going beyond its limits. The trajectory is set by a sequence of points and adjusted in real time based on satellite positioning data and environmental recognition systems.

Ключевые слова: автоматизированное управление, траектория движения, беспилотная трелевочная машина, энергоэффективность, экологическая безопасность.

Keywords: automated control, motion trajectory, unmanned skidding machine, energy efficiency, environmental safety.

Современное лесозаготовительное производство характеризуется активным внедрением принципов Индустрии 4.0, ключевыми из которых являются автоматизация и роботизация технологических процессов [1-3]. Одним из перспективных направлений является разработка коллаборативных систем, где часть операций выполняется техникой автономно, а другая часть под управлением оператора, что позволяет оптимизировать логистику на лесосеке, повысить общую производительность и безопасность труда [4, 5]. В рамках такой

модели возникает критическая необходимость в создании надежных алгоритмов для полностью автономного движения машин, таких как беспилотных трелевочных машин (БПТМ), по сложным траекториям в условиях реальной лесосеки [6, 7].

Данный закон представляет собой элемент системы управления поворотом БПТМ, обеспечивающий энергоэффективное и безопасное движение с пачкой деревьев в полупогруженном положении по заданному пути волока без участия оператора.

Траектория движения БПТМ задана точками T_i , расположенными по центру волока. Машина должна последовательно перемещаться из точки T_0 в T_1 , затем в T_2 , T_3 и так далее (рис. 1). Считается, что этап завершен, когда центр масс БПТМ C достигает очередной целевой точки. После этого система управления переключает направление движения к следующей точке.

Координаты всех точек заданы в виде $(x_i; y_i)$, а расстояние между ними ΔS_i вычисляется по формуле:

$$\Delta S_i = \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (x_i - x_{i-1})^2}, \quad (1)$$

Рассматриваемое движение по центру волока характерно для движения порожней БПТМ или БПТМ с сортиментами в полностью груженом состоянии.

Однако при трелевке пачки деревьев по участку волока, характеризуемым определенным радиусом поворота, необходимо исключать движение пачки вне волока, для этого необходимо, чтобы БПТМ двигалась по внешнему радиусу (R_4^n) поворота волока без выезда за его приделы, таким образом для БПТМ с пачкой деревьев необходимо осуществлять последовательное перемещение из точки T_1 , в точку T_2^n , далее в T_3^n , T_4^n и т. д. (рис. 1).

В этом случае расстояние между точками ΔS_i для II, III и IV участков волока может быть найдено выражениям представленными ниже.

С целью исключения выезда конца пачки деревьев за пределы волока при подъезде БПТМ к повороту необходимо обеспечить выравнивание пачки вдоль продольной оси машины. Для этого на участке II осуществляется перемещение БПТМ с пачкой из центра (T_1) волока к краю (T_2^n) на величину k_n .

$$k_n = \frac{b}{2} - \frac{B_{\text{БПТМ}}}{2}, \quad (2)$$

где b – ширина волока ($b = B_{\text{БПТМ}} + 1,5 \cdot 2$), минимальная ширина волока составляет 5 м;

$B_{\text{БПТМ}}$ – ширина БПТМ.

$$\Delta S_2^n = \sqrt{(y_i - (y_{i-1} - k_n))^2 + (x_i - (x_i + k_n \cdot 2))^2}, \quad (3)$$

Участок III характеризуется прямолинейным движением БПТМ вдоль края волока от точки T_2^n к началу поворота (T_3^n). Длина данного участка (L_{TC}) определяется общей длиной БПТМ ($L_{БПТМ}$) с пачкой деревьев (L_{Π}).

$$L_{TC} = L_{БПТМ} + L_{\Pi} \quad (4)$$

$$\Delta S_3^n = \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + L_{TC}^2} \quad (5)$$

На криволинейном участке (IV) волока точки координат $(x_i^n; y_i^n)$ и расстояние между ними ΔS_i^n может быть найдено:

$$\Delta S_i^n = \sqrt{[(y_i^n - k_{\Pi}) - (y_{i-1}^n - k_{\Pi} \cdot 0,7)]^2 + [x_i^n - (x_{i-1}^n + k_{\Pi} \cdot 0,7)]^2}, \quad (6)$$

При перемещении между точками траектория центра масс БПТМ C должна представлять собой кривую радиусом R :

$$R_i \approx \frac{\Delta S_i}{\Delta \theta}, \quad (7)$$

где $\Delta \theta$ – угол между осью симметрии БПТМ и отрезком, соединяющим две соседние точки.

Данный угол вычисляется по формуле:

$$\Delta \theta = \arcsin \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta S_i} - \theta_{M_0}, \quad (8)$$

где θ_{M_0} – текущий угол поворота корпуса БПТМ относительно оси X неподвижной системы координат.

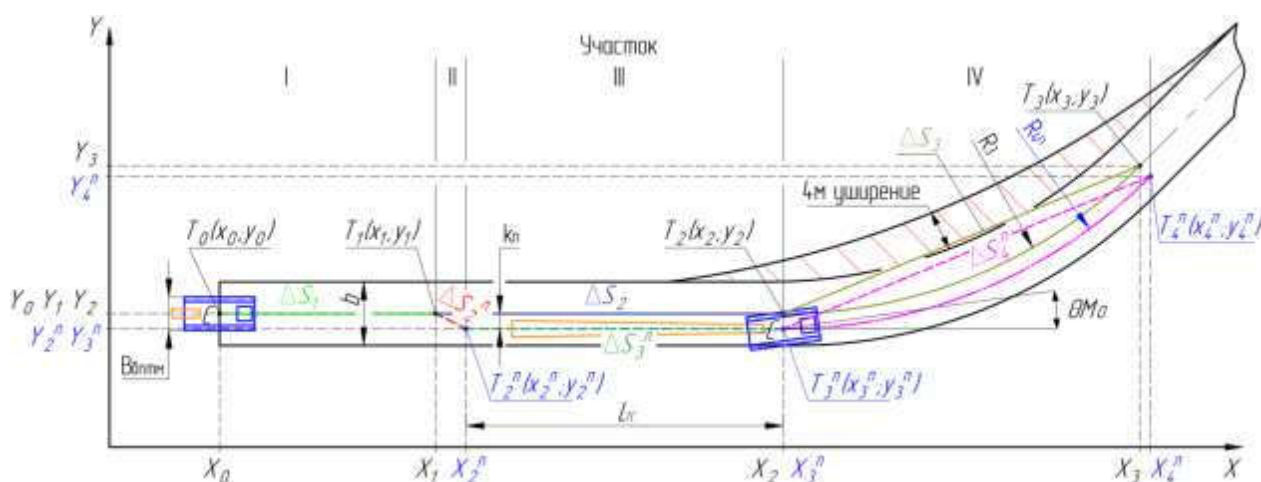


Рисунок 1 – Схема движения БПТМ с пачкой деревьев по заданной траектории

Электронный блок управления БПТМ непрерывно рассчитывает траекторию на основе приведенных уравнений при переходе от одной точки к следующей.

Координаты пути движения БПТМ можно фиксировать с помощью ГЛОНАСС/GPS-оборудования, записывая их в выбранной системе координат. Эта траектория будет использоваться в качестве эталонной при повторных проходах машины по трелевочному волоку. Движение по траектории должно осуществляться с минимальными отклонениями от нее и с высокой энергоэффективностью при этом определяется и фиксируется скоростной режим по пути с учетом ограничений по безопасности и кривизна пути.

На основе информации, получаемой от систем распознавания условий движения, в траекторию маршрута вносятся корректировки с целью повышения экологической безопасности при выполнении маневров на лесосеке, направленные на предотвращение выезда БПТМ за пределы волока.

Вывод

Разработанный закон управления позволяет реализовать полностью автоматизированное движение БПТМ с пачкой деревьев по заданному волоку, что повышает безопасность и энергоэффективность процесса трелевки. Ключевым аспектом закона является адаптация траектории движения машины (смещение от центра волока на внешний радиус поворота) для учета габаритов состава «машина-пачка», что исключает повреждение окружающего лесного массива и обеспечивает экологическую безопасность. Практическая реализация алгоритма основана на непрерывном расчете координат и поправок к курсу между точками пути с использованием спутниковых систем навигации (ГЛОНАСС/GPS), что обеспечивает высокую точность следования по эталонной траектории при повторных проходах.

Список литературы

1. Клубничкин В.Е. Краткий анализ тенденций развития лесозаготовительных машин / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.Б. Карташов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 3 (130). С. 93–102.
2. Клубничкин В.Е. Автоматизация технологических процессов лесозаготовительной машины / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, Д.И. Рогачев // Научно-технический вестник Поволжья. - 2021. - № 12. - С. 114-117.
3. Рогачев Д.И. Развитие Отечественной робототехники в лесной отрасли / Д.И. Рогачев, И.В. Козлов // Студенческий вестник. – 2020. – № 1-6(99). – С. 22-23.
4. Клубничкин В.Е. Коллаборативная технология трелевки древесины / В.Е. Клубничкин // В сборнике: Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор А.А. Платонов. Воронеж, 2022. С. 26-31.
5. Клубничкин В.Е. Формирование облика гусеничных беспилотных трелевочных машин / В.Е. Клубничкин // Материалы XX Международной научно-технической конференции. «Актуальные проблемы развития лесного комплекса». – Вологда: ВГУ, 2022. С. 287-291.
6. Редькин А.К. Технология и оборудование лесозаготовок: учеб.пособие /

А.К. Редькин. – М: МГУЛ, 2010. 178 с.

7. Запруднов В.И. Технологии и технические средства процессов лесосечных работ / В.И. Запруднов, С.П. Карпачев, М.А. Быковский // Лесной вестник. 2017. Т. 21. № 1. С. 108–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-108-117

References

1. Klubnichkin V.E. Brief analysis of trends in the development of logging machines / V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, A.B. Kartashov // Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev. 2020. № 3 (130). pp. 93–102.

2. Klubnichkin V.E. Automation of technological processes of a logging machine / V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, D.I. Rogachev // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. – 2021. – № 12. – pp. 114–117.

3. Rogachev D.I. Development of Domestic Robotics in the Forestry Industry / D.I. Rogachev, I.V. Kozlov // Student Bulletin. – 2020. – № 1-6(99). – pp. 22-23.

4. Klubnichkin V.E. Collaborative technology of timber skidding / V.E. Klubnichkin // In the collection: Modern forest complex of the country: problems and development trends. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference. Editor-in-chief A.A. Platonov. Voronezh, 2022. pp. 26-31.

5. Klubnichkin V.E. Formation of the appearance of tracked unmanned skidding machines / V.E. Klubnichkin // Proceedings of the XX International scientific and technical conference. «Actual problems of forest complex development». – Vologda: VSU, 2022. Pp. 287-291.

6. Redkin A.K. Technology and equipment for logging: textbook / A.K. Redkin. – М: MGUL, 2010. 178 p.

7. Zaprudnov V.I. Technologies and technical means of logging processes / V.I. Zaprudnov, S.P. Karpachev, M.A. Bykovsky // Forest Bulletin. 2017. Vol. 21. № 1. pp. 108–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-108-117