

О.А. Михайлов, А.В. Андронов, Г.С. Тарадин, С.Ф. Козьмин, И.А. Зверев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕДАТОЧНОГО ЧИСЛА ТРАНСМИССИИ КОЛЕСНОГО СКИДДЕРА

Введение. Одним из основных способов заготовки древесины наряду с сортиментной является заготовка в хлыстах, сохраняющая уверенные позиции как в России, так и во всем мире. Комплекс лесосечных машин, осуществляющих хлыстовую заготовку, может включать валочно-пакетирующую машину, трелевочный трактор с пачковым захватом и сучкорезную машину.

С каждым годом на мировой рынок выпускаются новые, а также модернизируются выпускавшиеся ранее модели лесосечных машин для хлыстовой заготовки. Среди ведущих фирм изготовителей данной техники можно отметить такие компании, как John Deere, Tigercat, Caterpillar, Komatsu. Сегодня как за рубежом, так и в нашей стране, накоплен колоссальный опыт в области конструирования и эксплуатации лесосечных машин, работающих по хлыстовой технологии заготовки древесины.

Отдельного внимания в этом комплексе машин заслуживают скиддеры – лесопромышленные тракторы, предназначенные для сбора, последующей трелевки и разгрузки на площадке верхнего склада пачек деревьев, подготовленных валочно-пакетирующей машиной. Наибольшего распространения получили бесчokerные скиддеры с колесной формулой 4К4 и шарнирно-сочлененной рамой, использующие в качестве технологического оборудования манипуляторы арочного типа с гидравлическим приводом, а в качестве рабочего органа – клещевой захват, способный надежно удерживать в процессе трелевки пачки деревьев объемом порядка 4–7 м³. По такой компоновке выполнены многие скиддеры зарубежного производства, такие как Cat 525D, Tigercat 630H, John Deere 640L и др.

Достойным конкурентом зарубежным колесным скиддерам можно назвать отечественный скиддер ТЛК-1 Онежского тракторного завода с гидромеханической трансмиссией и колесной формулой 4К4. Механическая часть трансмиссии выполнена по схеме блокированного (жестко связанного) привода ведущих мостов и, кроме того, с муфтами свободного хода в ведущих мостах, которые выполняют функцию межколесных дифференциалов.

Учитывая тяжелые условия эксплуатации скиддеров, во многом зависящие от почвогрунтовых характеристик трелевочных волоков, необходим грамотный подход к проектированию трансмиссий скиддеров. Одним из важнейших этапов конструкторской разработки трелевочных систем является выбор передаточного ряда трансмиссии. Данное исследование направлено на решение этой проблемы, являющейся безусловно актуальной.

Цель исследования – на основании экспериментальных исследований нагруженности трансмиссии трелевочного трактора ТЛК-1 разработать математическую модель, позволяющую на этапе конструкторской разработки колесного скиддера оценить правильность выбора передаточного ряда гидромеханической трансмиссии.

Методика исследования. При выборе схемы математической модели, позволяющей прогнозировать передаточное число трансмиссии, использовались результаты экспериментальных исследований нагруженности трансмиссии колесного скиддера ТЛК-1 при трелевке пачки деревьев объемом 7 м^3 на I, II и III передачах. Испытания проходили на полигональном отрезке длиной 1500 м и разбитым на 15 равных пикетов. В плане полигон напоминает цифру 8.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан комплекс измерительной аппаратуры, позволяющий регистрировать крутящий момент в пяти точках трансмиссии, а именно – на полуосях и карданном валу. Помимо крутящих моментов в трансмиссии регистрировались и измерялись углы поворота полуосей и карданной передачи, частота вращения коленчатого вала и время протекания процессов. Стоит также отметить высокую точность проведенных измерений, простоту электрической схемы измерительной аппаратуры, малую стоимость приборов, их высокую надежность и безотказность.

Результаты исследования. Суммарный коэффициент сопротивления движению трелевочной системы ψ определяется формулой [Михайлов, 1986; Анисимов, Перельман, Михайлов, 1986]:

$$\psi = \frac{M_{\text{ен}} K_3 K i_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}}{(G + Q) r_{\text{д}}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{ен}}$ – номинальный крутящий момент двигателя, Нм; K_3 – коэффициент загрузки двигателя по крутящему моменту; K – коэффициент трансформации; $i_{\text{тр}}$ – передаточное число механической части трансмиссии; $\eta_{\text{тр}}$ – механический КПД трансмиссии; G – вес трактора, Н; Q – вес пачки леса, Н; $r_{\text{д}}$ – динамический радиус колеса, м.

Формулу (1) удобно представить в виде

$$i_{\text{тр}} = c \frac{\Psi}{K},$$

где неслучайный множитель c определяется формулой

$$c = \frac{(G + Q)r_{\text{д}}}{M_{\text{ен}} K_3 \eta_{\text{тр}}}.$$

Следует отметить, что суммарный коэффициент сопротивления движению трелевочной системы представляет собой следующую сумму отдельных коэффициентов сопротивления [Михайлов, 1986; Анисимов, Перельман, Михайлов, 1986]:

$$\Psi = f_c + i + f_{\text{пов}}, \quad (2)$$

где f_c – коэффициент сопротивления движению трелевочной системы; i – уклон волока; $f_{\text{пов}}$ – коэффициент сопротивления повороту.

Случайная величина ψ распределена по закону Грама-Шарлье с плотностью:

$$f_1(\psi) = \frac{1}{\sigma} \varphi\left(\frac{x-a}{\sigma}\right) \left[1 + \frac{1}{3!} \alpha H_3\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)\right], \quad (3)$$

где $\varphi(y)$ – стандартная плотность нормального распределения; $H_3(y) = y^3 - 3y$ – полином Чебышева–Эрмита.

Закон распределения случайной величины K может быть определен на основании экспериментальных данных (рис. 1, 2) [Абрамовиц, Стиган, 1979]. С этой целью используем распределение I/i и связь между случайными величинами K и I/i .

Зная время использования отдельных передач (рис. 2), по формуле

$$P = \frac{1}{\frac{\alpha_1}{100P_I} + \frac{\alpha_2}{100P_{II}} + \frac{\alpha_3}{100P_{III}}} \quad (4)$$

можно перейти к обобщенной кривой в целом за рейс.

Функция $f(I/i)$ плотностей распределения вероятностей I/i определяется с помощью метода моментов. Из вида выражения гистограммы (рис. 3) следует, что эта плотность принадлежит семейству кривых Грама–Шарье. Имеем:

$$f_A(x) = \frac{1}{\sigma} \left[\varphi\left(\frac{x-MX}{\sigma}\right) - \frac{\alpha \dots}{6} \varphi\left(\frac{x-MX}{\sigma}\right) \right], \quad (5)$$

где

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right).$$

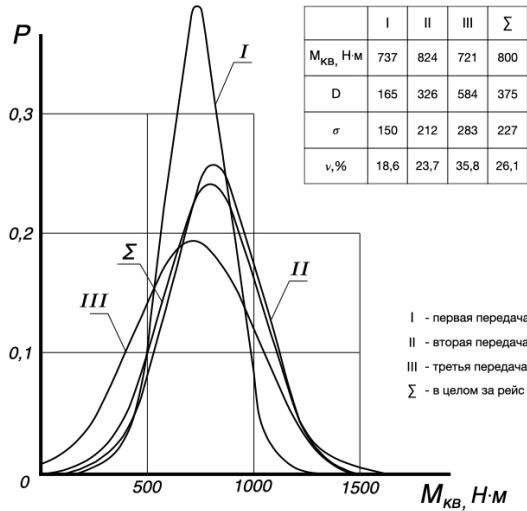


Рис. 1. Кривые распределения крутящего момента на валу турбины по передачам (I, II, III) и в целом за рейс (Σ)

Fig. 1. Curves of torque distribution on the turbine shaft by gears (I, II, III) and in general for the trip (Σ)

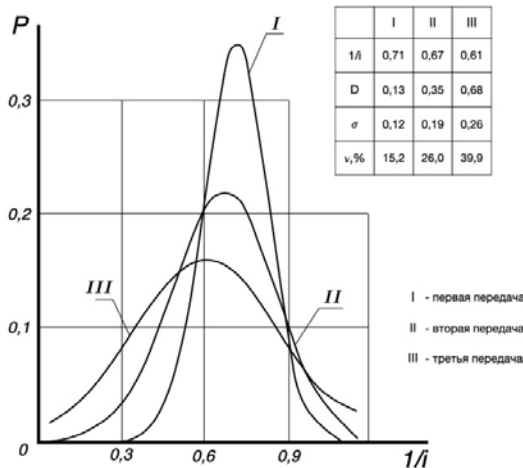


Рис. 2. Кривые распределения кинематического передаточного отношения $1/i$ гидротрансформатора по передачам (I, II, III)

Fig. 2. Curves of distribution of the kinematic gear ratio $1/i$ of the torque converter by gears (I, II, III)

Связь между случайными величинами $1/i$ и K установлена экспериментально (рис. 4). Обработка этих данных по методу наименьших квадратов дает следующие уравнения линейной регрессии:

$$K = -2,37X + 2,91, \quad (6)$$

$$X = -0,43K + 1,23, \quad (7)$$

где $X = 1/i$.

Используя (6) и (7) и проведя некоторые преобразования, получаем, что искомая плотность распределения случайной величины K описывается формулой

$$g(K) = \frac{1}{0,466} \varphi\left(\frac{K - 1,35}{0,446}\right). \quad (8)$$

График плотности распределения вероятностей случайной величины K представлен на рис. 5.

Отметим, что ошибка, связанная с заменой бесконечного интервала изменения случайной величины K на конечный интервал $(0,530; 3,252)$, не превышает 3%. Это следует из формулы (6).

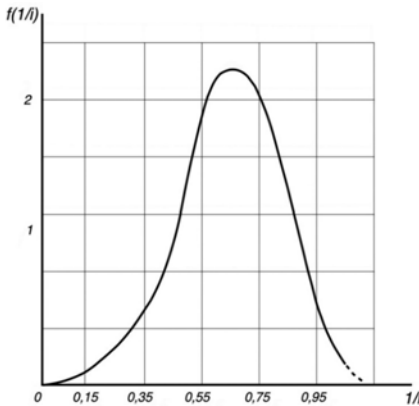


Рис. 3. Обобщенная кривая распределения $1/i$

Fig. 3. Generalized distribution curve $1/i$

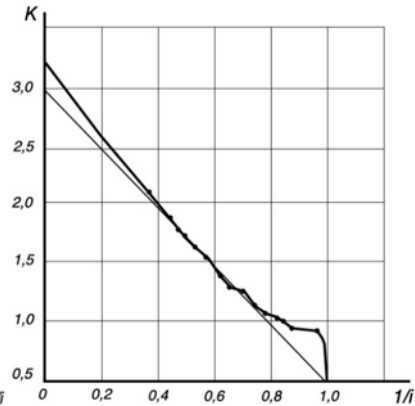


Рис. 4. График зависимости между $1/i$ и K , полученный экспериментально и обработанный по методу наименьших квадратов

Fig. 4. Graph of the relationship between $1/i$ and K , obtained experimentally and processed by the least squares method

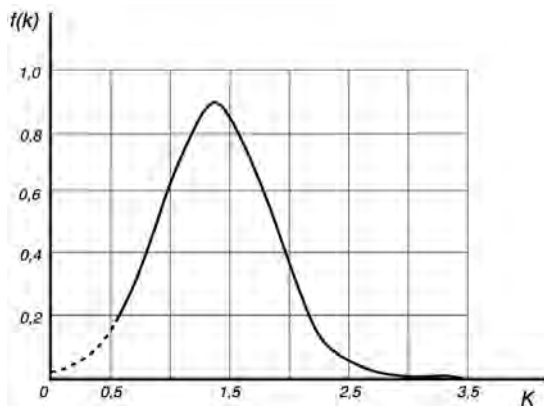


Рис. 5. График плотности распределения вероятностей K
 Fig. 5. The graph of the probability distribution density K

Напомним, что плотности распределения ψ и K задаются формулами (3) и (8). Эти случайные величины можно считать независимыми, поэтому совместная плотность $f(\psi, K)$ двумерного случайного вектора (ψ, K) задается выражением:

$$f_0(\psi, K) = f_1(\psi) f_2(K) \quad (9)$$

$$(\psi \geq 0; 0,530 \leq K \leq 3,252),$$

где для удобства записи перешли от $g(K)$ к $f_2(K)$.

Плотность распределения $f_3(y)$ двух случайных величин $\psi/K = y$, как известно, может быть определена по двумерной плотности $f_0(\psi, K)$ случайного вектора (ψ, K) с помощью формулы

$$f_3(y) = \int_0^{\infty} t f_1(t) f_2(yt) dt. \quad (10)$$

Случайные величины $i_{тр}$ и y в силу формулы (1) связаны зависимостью

$$i_{тр} = cy, \quad (11)$$

где $c > 0$ – неслучайная величина.

Значит, плотность распределения $f(i_{тр})$ должна задаваться формулой

$$f(i^M) = \frac{1}{c} f_3\left(\frac{i^M}{c}\right), \quad (12)$$

и согласно (10) имеем:

$$f(i_{\text{тр}}) = \frac{1}{c} \int_0^{\infty} t f_1(t) f_2\left(\frac{i_{\text{тр}}}{c} t\right) dt. \quad (13)$$

Формулы (3), (8) и (13) позволяют теоретически найти плотность распределения $f(i_{\text{тр}})$ случайной величины $i_{\text{тр}}$.

Выводы. Предложенная методика прогнозирования использования передач колесного трелевочного трактора с гидромеханической трансмиссией позволяет на стадии проектирования оценить правильность выбора передаточного ряда. Следует отметить, что математическая модель учитывает целый ряд факторов эксплуатации лесозаготовительной техники, что повышает ее адекватность.

Библиографический список

Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 832 с.

Анисимов Г.М. Условия эксплуатации и нагруженность трансмиссии трелевочного трактора. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 165 с.

Анисимов Г.М., Перельман А.Я., Михайлов О.А. Метод получения обобщенного закона распределения свойств трелевочного волокна // Повышение эксплуатационной эффективности машин для лесозаготовок и лесного хозяйства: межвуз. сб. науч. тр. Л.: 1986. С. 11–14. (In Russ.)

Ву Хай Куан, Валяжонков В.Д., Довжик В.Л., Михайлов О.А. Исследование влияния передаточных чисел гидромеханических трансмиссий на технико-экономические показатели трелевочного трактора // Вестник КрасГАУ. 2014. № 3. С. 184–189.

Ву Хай Куан, Довжик В.Л., Андронов А.В., Михайлов О.А. Методика определения оптимальных рабочих передаточных чисел гидромеханической трансмиссии трелевочного трактора // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014. Вып. 208. С. 73–83.

Мартынов Б.Г., Козленок А.В., Михайлов О.А. Повышение производительности лесозаготовительных машин путем оптимизации параметров гидромеханической трансмиссии // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2015. Вып. 210. С. 119–130/

Михайлов О.А. Улучшение тягово-скоростных свойств трелевочного трактора и снижение энергоемкости трелевки путем увеличения приспособляемости дизеля: дис. ... канд. техн. наук, Л.: ЛТА, 1986. 198 с.

Михайлов О.А., Тарадин Г.С., Спиридонов С.В., Козьмин С.Ф., Пушков Ю.Л. Методика определения оптимального передаточного ряда гидромеханической трансмиссии // Актуальные вопросы транспорта в лесном комплексе: матер. Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. С. 42–47.

Сергеев В.П. Обоснование основных параметров гидромеханической трансмиссии лесопромышленных тракторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛТА, 1990. 19 с.

Шуткин С.А., Довзжик В.Л., Куан Ву Хай [и др.] Методика выбора рабочих передач трелевочного трактора // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012. Вып. 201. С. 88–98.

References

Abramovic M., Stigan I. Spravochnik po special'nym funkciyam. M.: Nauka, 1979. 832 p. (In Russ.)

Anisimov G.M. Usloviya ekspluatatsii i nagruzhennost' transmissii trelevochnogo traktora. M.: Lesn. prom-st', 1975. 165 p. (In Russ.)

Anisimov G.M., Perel'man A.Y., Mihajlov O.A. Metod polucheniya obobshchennogo zakona raspredeleniya svoystv trelevochnogo voloka. Interuniversity collection of scientific papers. *Povyshenie ekspluatatsionnoj effektivnosti mashin dlya lesozagotovok i lesnogo hozyajstva*, L.: 1986, p.11–14. (In Russ.)

Martynov B.G., Kozlenok A.V., Mihajlov O.A. Povyshenie proizvoditel'nosti lesozagotovitel'nyh mashin putem optimizatsii parametrov gidromekhanicheskoy transmissii. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2015, iss. 210, pp. 119–130. (In Russ.)

Mihajlov O.A. Uluchshenie tyagovo-skorostnyh svoystv trelevochnogo traktora i snizhenie energoemkosti trelevki putem uvelicheniya prispособlyaemosti dizelya. Candidate's thesis, L.: FTA, 1986. 198 p. (In Russ.)

Mihajlov O.A., Taradin G.S., Spiridonov S.V., Koz'min S.F., Pushkov Y.L. Metodika opredeleniya optimal'nogo peredatochnogo ryada gidromekhanicheskoy transmissii. *Aktual'nye voprosy transporta v lesnom komplekse: materialy Vserossiyskoy Nauchno-prakticheskoy konferencii*. SPb.: SPbFTU, 2020, pp. 42–47. (In Russ.)

Sergeev V.P. Obosnovanie osnovnyh parametrov gidromekhanicheskoy transmissii lesopromyshlennyh traktorov: abstract of candidate's thesis. L.: FTA, 1990. 19 p. (In Russ.)

Shutkin S.A., Dovzhik V.L., Kuan Vu Haj [at al.] Metodika vybora rabochnih peredach trelevochnogo traktora. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2012, iss. 201, pp. 88–98. (In Russ.)

Vu Haj Kuan, Dovzhik V.L., Andronov A.V., Mihajlov O.A. Metodika opredeleniya optimal'nyh rabochnih peredatochnykh chisel gidromekhanicheskoy transmissii trelevochnogo traktora. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2014, iss. 208, pp. 73–83. (In Russ.)

Vu Haj Kuan, Valyazhonkov V.D., Dovzhik V.L., Mihajlov O.A. Issledovanie vliyaniya peredatochnykh chisel gidromekhanicheskikh transmissij na tekhniko-ekonomicheskie pokazateli trelevochnogo traktora. *Vestnik KrasGAU*, 2014, no. 3, pp.184–189. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 24.09.2021

Михайлов О.А., Андронов А.В., Тарадин Г.С., Козьмин С.Ф., Зверев И.А. Математическая модель прогнозирования использования передаточного числа трансмиссии колесного скиддера // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 238. С. 113–123. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.113-123

Трелевочный трактор является одним из важнейших видов лесосечной техники, требующей грамотного подхода к процессу проектирования, который учитывает особенности условий эксплуатации данного вида техники. Одной из самых нагруженных частей колесных скиддеров является трансмиссия, которая испытывает значительные нагрузки в процессе эксплуатации. Для регистрации и измерения значений величин этих нагрузок в зависимости от передачи, на которой осуществляется процесс трелевки пачки деревьев, проведены испытания трелевочного трактора ТЛК-1, проходившие на полигоне-волоке Онежского тракторного завода. В результате испытаний определены значения крутящих моментов на полуосях и карданном валу скиддера на различных передачах, а также время использования каждой из передач. Полученные в ходе испытаний данные обработаны с помощью методов стохастического математического моделирования. В результате получена математическая модель прогнозирования использования передаточного числа трансмиссии колесного трелевочного трактора, оснащенного гидродинамической передачей. Данная методика позволяет на стадии проектирования оценить правильность выбора передаточного ряда трансмиссии.

Ключевые слова: математическая модель, прогнозирование, коэффициент сопротивления движению, закон распределения случайной величины, кривые распределения, трелевочный трактор, колесный скиддер.

Mikhailov O.A., Andronov A.V., Taradin G.S., Kozmin S.F., Zverev I.A. Mathematical model for predicting the usage of the transmission ratio of a wheel skidder. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2022, iss. 238, pp. 113–123 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.113-123

The skidder is one of the most important types of forestry it requires a competent approach to the design process, which of this type of equipment is one of the most important types of forestry machinery. One of the most loaded part of wheeled skidders is the transmission, which it experiences significant loads in the process of operation. To record and to measure the values of these loads depending on the gear, on which the process of skidding a pack of trees is carried out. Which the process of skidding a pack of trees is carried out, were carried out tests of the skidder TLK-1, which took place on the firing ground Onega tractor plant. As a result of tests were determined values of torques on axles and cardan shaft of the skidder on different gears, as well as the time of using each of the gears. The data obtained during the tests were processed using the

methods of stochastic mathematical modeling. As a result, a mathematical model mathematical model to predict the usage of gear ratio of a wheeled skidder transmission equipped with hydrodynamic transmission. This methodology allows to estimate the correctness of the choice of the transmission ratio at the design stage. Design stage to assess the correctness of the choice of the transmission gear ratio.

Key words: mathematical model, forecasting, movement resistance coefficient, distribution law of a random variable, distribution curves, skidder, wheel skidder

МИХАЙЛОВ Олег Андреевич – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 4681-4898.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kerro07@mail.ru

МИХАЙЛОВ Oleg A. – PhD (Technical), associate professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4681-4898.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: kerro07@mail.ru

АНДРОНОВ Александр Вячеславович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 8345-3722.

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

ANDRONOV Alexander V. – PhD (Technical), associate professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8345-3722.

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

ТАРАДИН Григорий Сергеевич – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 5247-6595.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: grisha190@mail.ru

TARADIN Grigory S. – PhD (Technical), associate professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5247-6595.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: grisha190@mail.ru

КОЗЬМИН Сергей Федорович – доцент лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 6778-0352.

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

KOZMIN Sergey F. – PhD (Technical), associate professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6778-0352.

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

ЗВЕРЕВ Игорь Андреевич – ассистент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 1126-2121.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: igorzv1997@gmail.com

ZVEREV Igor A. – assistant of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1126-2121.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: igorzv1997@gmail.com