

В.Н. Шиловский, И.Г. Скобцов, Д.Г. Конанов

**ОЦЕНКА ФАКТОРОВ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ МАШИН
МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА**

Введение. Технологичность конструкций лесных машин является функцией целого ряда факторов: конструктивных, производственных и эксплуатационных. Влияние этих факторов на характеристики эксплуатационной технологичности (ЭТ) определяется как назначением и конструктивными особенностями, так и условиями эксплуатации, технического обслуживания (ТО) и ремонта машин. Оценка влияния данных факторов на ремонтпригодность как одного из показателей ЭТ лесных машин является актуальной задачей, связанной с минимизацией затрат на их техническую эксплуатацию [Шиловский, Питухин, Кяльвийнен, Костюкевич, 2014].

Для оценки степени влияния эксплуатационных факторов на ремонтпригодность находят применение методы анализа корреляции и регрессии, имеющие глубокую историю своего развития [Лоули, Максвелл, 1967; Хан, Шапиро, 1969]. В задачи регрессионного анализа входит получение статистической модели, устанавливающей связь между, например, ремонтпригодностью как признаком ЭТ и факторами, определяющими величины показателей ремонтпригодности [Амиров, Алферова, Волков, 1990]. Значение интервала изменения рассматриваемых параметров определяет вид (порядок): при снижении величины интервала целесообразно применение линейного уравнения связи [Волков, Аристов, 1975]. В линейном случае в качестве показателей тесноты связи между исследуемыми случайными величинами используются парные коэффициенты корреляции. При этом следует учитывать, что некоторые коэффициенты парной корреляции между факторами могут быть достаточно велики и даже близки по абсолютной величине к единице. Это свидетельствует о том, что проводится изучение не самих факторов, определяющих изменчивость признака, а зависимых от них случайных величин. В связи с этим представляется целесообразным отбрасывать один из таких коррелированных факторов [Лоули, Максвелл, 1967]. В то же время значения коэффициентов регрессии зависят от полноты учета совокупности факторов, определяющих изменчивость признака. Одним из критериев правильности и полноты отбора факторов является коэффициент

детерминации R^2 [Хан, Шапиро, 1969]. При этом если значение R^2 достаточно велико (например, $R^2 > 0,5$), то это значит, что влияющие факторы учтены с необходимой полнотой и значения оценок коэффициентов регрессии близки к истинным значениям [Гмурман, 2003].

Важным в статистических исследованиях является анализ полученного уравнения регрессии. Для этого необходимо проведение проверки гипотезы о соответствии построенной модели результатам наблюдений. Критерием проверки гипотезы об адекватности уравнения регрессии, как правило, служит F -критерий Фишера (критерий дисперсионного отношения), а для проверки значимости коэффициентов модели – t -критерий Стьюдента [Питухин, 2017].

Таким образом, цель работы заключается в обосновании и апробации порядка оценки факторов ЭТ, определяющих ремонтпригодность лесных машин с использованием методов анализа корреляции и регрессии.

Методика исследования. Рассмотрим факторы ЭТ на примере лесозаготовительных машин (ЛЗМ), представив их в виде «Дерева целей и задач оценки и улучшения ЭТ и повышения эффективности ЛЗМ» на рисунке (приняты следующие обозначения: ТСМ – топливно-смазочные материалы; ПЦТО – пункт централизованного технического обслуживания; ППТО – передвижной пункт технического обслуживания; РММ – ремонтно-механические мастерские; РМЗ – ремонтно-механический завод; СТО – станция технического обслуживания; ЗПЧ – запасные части).

Для проведения исследования и оценки влияния эксплуатационных факторов на ремонтпригодность объекта методом регрессионного анализа определим номенклатуру факторов, определяющих продолжительность технических воздействий на транспортно-технологические машины:

- длительность эксплуатации машин (X_1);
- стаж работы ремонтных рабочих (X_2);
- техническая оснащенность ремонтной базы (X_3).

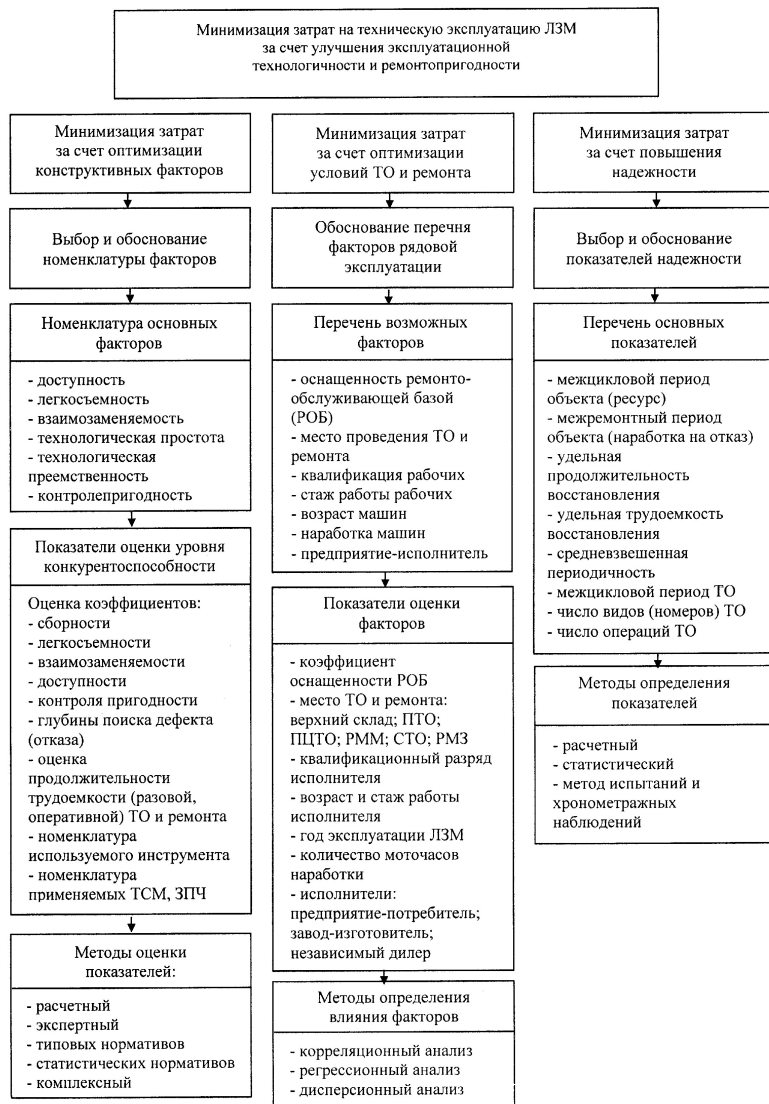
Определим влияние данных факторов на продолжительность технического обслуживания и текущего ремонта (Y) машин.

Статистические характеристики исследуемых факторов, полученные по результатам 175 наблюдений ($n = 175$) приведены в табл. 1.

Связь между продолжительностью технических воздействий Y и факторами исследуем в виде множественной линейной модели

$$Y = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + E,$$

где C_0 , C_i – неизвестные параметры (коэффициенты) модели, значения которых оцениваются в ходе обработки опытных данных; E – остаток, характеризующий ошибку эксперимента и ошибку выбора модели.



Дерево целей и задач оценки и улучшения ЭТ и повышения эффективности ЛЗМ7

Tree of goals and objectives for evaluating and improving the operational manufacturability and increasing the efficiency of a forest machine

Таблица 1

Величины среднестатистических значений исследуемых параметров

Statistical values of research parameters

Исследуемые параметры	Обозначение	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение
Срок эксплуатации машин, 10^{-3} , ч	X_1	12,90	3,00 [$S(X_1)$]
Стаж работы ремонтных рабочих, 10^{-2} , лет	X_2	0,05	0,01 [$S(X_2)$]
Техническая оснащенность ремонтной базы, 10^{-7} , тыс. руб.	X_3	0,09	0,02 [$S(X_3)$]
Продолжительность технических воздействий, ч	Y	3,10	0,70 [$S(Y)$]

Статистические значения парных коэффициентов корреляции между величинами X_i и Y определяются по формуле [Лоули, Максвелл, 1967]

$$r_{YX_i} = \frac{1}{nS(X)S(Y)} \sum_{u=1}^n (x_{iu} - \bar{X}_i)(y_u - \bar{Y}).$$

Коэффициенты корреляции между величинами X_i и X_j определяются по формуле

$$r_{X_iX_j} = \frac{1}{nS(X_i)S(X_j)} \sum_{u=1}^n (x_{iu} - \bar{X}_i)(x_{ju} - \bar{X}_j),$$

где n – число наблюдений (объем выборки); $\bar{Y}$, $\bar{X}_i$, $\bar{X}_j$ – выборочные средние случайных величин Y , X_i , X_j ,

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_u y_u, \quad \bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_u x_{iu}, \quad \bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_u x_{ju};$$

$S(Y)$, $S(X_i)$, $S(X_j)$ – оценки средних квадратических отклонений случайных величин Y , X_i , X_j ,

$$S(Y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_u - \bar{Y})^2}, \quad S(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (x_{iu} - \bar{X}_i)^2},$$

$$S(X_j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (x_{ju} - \bar{X}_j)^2}.$$

В результате расчетов получены значения коэффициентов парной корреляции, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Величины коэффициентов парной корреляции**Values of pair correlation coefficients**

Фактор	Y	X_1	X_2	X_3
X_1	0,56	1,00	0,03	0,18
X_2	0,30	0,03	1,00	0,33
X_3	0,37	0,18	0,33	1,00
Y	1,00	0,56	0,30	0,37

В стандартизированном масштабе уравнение регрессии имеет вид [Езекиел, Фокс, 1966]:

$$t_y = d_1 t_{x_1} + d_2 t_{x_2} + d_3 t_{x_3},$$

$$\text{где } t_y = \frac{Y - \bar{Y}}{S(Y)}; \quad t_{x_i} = \frac{X_i - \bar{X}_i}{S(X_i)}.$$

Система нормальных уравнений, используемая для определения значений коэффициентов регрессии, имеет вид [Хан, Шапиро, 1969]:

$$r_{YX1} = d_1 + d_2 r_{x_2 x_1} + d_3 r_{x_3 x_1};$$

$$r_{YX2} = d_1 r_{x_1 x_2} + d_2 + d_3 r_{x_3 x_2};$$

$$r_{YX3} = d_1 r_{x_1 x_3} + d_2 r_{x_2 x_3} + d_3.$$

Значение оценок d_i находим методом определителей, для чего вычисляем определитель $\Delta(R_m)$, когда $m = 4$ ($m = k + 1$, где $k = 3$, т. е. отражает число факторов) [Гмурман, 2003].

Определитель системы нормальных уравнений

$$\Delta(R_4) = \begin{vmatrix} 1,00 & 0,03 & 0,18 \\ 0,03 & 1,00 & 0,33 \\ 0,18 & 0,33 & 1,00 \end{vmatrix} = 0,86.$$

Значения определителей $\Delta_1(R_4)$, $\Delta_2(R_4)$, $\Delta_3(R_4)$:

$$\Delta_1(R_4) = \begin{vmatrix} 0,56 & 0,03 & 0,18 \\ 0,30 & 1,00 & 0,33 \\ 0,37 & 0,33 & 1,00 \end{vmatrix} = 0,44;$$

$$\Delta_2(R_4) = \begin{vmatrix} 1,00 & 0,56 & 0,18 \\ 0,03 & 0,30 & 0,33 \\ 0,18 & 0,37 & 1,00 \end{vmatrix} = 0,19;$$

$$\Delta_3(R_4) = \begin{vmatrix} 1,00 & 0,03 & 0,56 \\ 0,03 & 1,00 & 0,30 \\ 0,18 & 0,33 & 0,37 \end{vmatrix} = 0,18.$$

Значения оценок стандартизированных коэффициентов:

$$d_1 = \frac{\Delta_1(R_4)}{\Delta(R_4)} = \frac{0,44}{0,86} = 0,51;$$

$$d_2 = \frac{\Delta_2(R_4)}{\Delta(R_4)} = \frac{0,19}{0,86} = 0,22;$$

$$d_3 = \frac{\Delta_3(R_4)}{\Delta(R_4)} = \frac{0,18}{0,86} = 0,21.$$

Определим величины коэффициентов регрессии в натуральном масштабе [Лоули, Максвелл, 1967]:

$$b_1 = d_1 \frac{S(Y)}{S(X_1)} = 0,51 \frac{0,70}{3,00} = 0,12;$$

$$b_2 = d_2 \frac{S(Y)}{S(X_2)} = 0,22 \frac{0,70}{0,01} = 15,40;$$

$$b_3 = d_3 \frac{S(Y)}{S(X_3)} = 0,21 \frac{0,70}{0,02} = 7,35;$$

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 - b_3 \bar{X}_3 = 3,1 - 0,12 \cdot 12,90 - 15,40 \cdot 0,05 - 7,35 \cdot 0,09 = 0,12.$$

Таким образом, уравнение регрессии, учитывающее три рассматриваемых фактора, приобретает вид:

$$Y = 0,12 + 0,12 X_1 + 15,40 X_2 + 7,35 X_3.$$

Для оценки полноты отобранных факторов определим величину множественного коэффициента корреляции и коэффициента детерминации [Лоули, Максвелл, 1967].

Коэффициент корреляции

$$R_{Y \times X_1 X_2 X_3} = \sqrt{d_1 r_{YX_1} + d_2 r_{YX_2} + d_3 r_{YX_3}} = \\ = \sqrt{0,51 \cdot 0,56 + 0,22 \cdot 0,30 + 0,21 \cdot 0,37} = 0,65.$$

Коэффициент детерминации

$$R_{Y \times X_1 X_2 X_3}^2 = 0,65^2 = 0,43.$$

Следовательно, изменчивость продолжительности ремонта обусловлена действием рассматриваемых факторов на 43%, а остальная часть – действием неучтенных факторов. Для оценки значимости рассматриваемых факторов проведем дисперсионный анализ [Волков, Аристов, 1975; Шиловский, Скобцов, 2019]:

Определим дисперсии коэффициентов регрессии:

$$S(b_0) = \frac{S(Y)}{\sqrt{n}} = \frac{0,70}{\sqrt{175}} = 0,053.$$

Для вычисления значений $S(b_1)$, $S(b_2)$, $S(b_3)$ определяем величины $R_{X_1 \times X_2 X_3}$, $R_{X_2 \times X_1 X_3}$, $R_{X_3 \times X_1 X_2}$:

$$R_{X_1 \times X_2 X_3} = \frac{r_{X_1 X_2}^2 + r_{X_1 X_3}^2 - 2r_{X_1 X_2} \cdot r_{X_1 X_3} \cdot r_{X_2 X_3}}{1 - r_{X_2 X_3}^2} = \frac{0,03^2 + 0,18^2 - 2 \cdot 0,03 \cdot 0,18 \cdot 0,33}{1 - 0,33^2} = 0,033, \\ R_{X_2 \times X_1 X_3} = \frac{r_{X_1 X_2}^2 + r_{X_2 X_3}^2 - 2r_{X_1 X_2} \cdot r_{X_1 X_3} \cdot r_{X_2 X_3}}{1 - r_{X_1 X_3}^2} = \frac{0,03^2 + 0,33^2 - 2 \cdot 0,03 \cdot 0,18 \cdot 0,33}{1 - 0,18^2} = 0,11, \\ R_{X_3 \times X_1 X_2} = \frac{r_{X_1 X_3}^2 + r_{X_2 X_3}^2 - 2r_{X_1 X_2} \cdot r_{X_1 X_3} \cdot r_{X_2 X_3}}{1 - r_{X_1 X_2}^2} = \frac{0,18^2 + 0,33^2 - 2 \cdot 0,03 \cdot 0,18 \cdot 0,33}{1 - 0,33^2} = 0,14.$$

Тогда значения средних квадратичных отклонений коэффициентов регрессии равны:

$$S(b_1) = \frac{S(Y)}{\sqrt{n}S(X_1)} \cdot \frac{\sqrt{1 - R_{Y \times X_1 X_2 X_3}^2}}{\sqrt{1 - R_{X_1 \times X_2 X_3}^2}} = \frac{0,70}{\sqrt{175} \cdot 3,00} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,65^2}}{\sqrt{1 - 0,033^2}} = 0,014; \\ S(b_2) = \frac{S(Y)}{\sqrt{n}S(X_2)} \cdot \frac{\sqrt{1 - R_{Y \times X_1 X_2 X_3}^2}}{\sqrt{1 - R_{X_2 \times X_1 X_3}^2}} = \frac{0,70}{\sqrt{175} \cdot 0,01} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,65^2}}{\sqrt{1 - 0,11^2}} = 4,03; \\ S(b_3) = \frac{S(Y)}{\sqrt{n}S(X_3)} \cdot \frac{\sqrt{1 - R_{Y \times X_1 X_2 X_3}^2}}{\sqrt{1 - R_{X_3 \times X_1 X_2}^2}} = \frac{0,70}{\sqrt{175} \cdot 0,02} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,65^2}}{\sqrt{1 - 0,14^2}} = 1,61.$$

Значимость коэффициентов регрессии проверим по критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = n - 1 = 174$. Таким образом, $t_{0,95;174} = 1,97$ [Гмурман, 2003].

Тогда:

$$t_{b_0} = \frac{b_0}{S(b_0)} = \frac{0,12}{0,053} = 2,26 > t_{0,95;174} = 1,97;$$

$$t_{b_1} = \frac{b_1}{S(b_1)} = \frac{0,12}{0,014} = 8,57 > t_{0,95;174} = 1,97;$$

$$t_{b_2} = \frac{b_2}{S(b_2)} = \frac{15,40}{4,03} = 3,82 > t_{0,95;174} = 1,97;$$

$$t_{b_3} = \frac{b_3}{S(b_3)} = \frac{7,35}{1,61} = 4,57 > t_{0,95;174} = 1,97.$$

Выводы. Все рассматриваемые факторы являются значимыми для оценки продолжительности технического обслуживания и ремонта лесных машин. Наибольшее влияние на продолжительность технических воздействий оказывает длительность эксплуатации лесных машин. Влияние стажа работы (квалификации) исполнителей и уровня оснащенности ремонтно-обслуживающей базы незначительно отличаются друг от друга, однако уровень оснащенности ремонтной базы является более значимым.

Библиографический список

Амиров Ю.Д., Алферова Т.К., Волков П.Н. Технологичность конструкции изделия: справочник. М.: Машиностроение, 1990. 768 с.

Волков П.Н., Аристов А.И. Ремонтопригодность машин. М.: Машиностроение, 1975. 368 с.

Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.

Езекиел М., Фокс К. Методы анализа корреляции и регрессии. М.: Статистика, 1966. 560 с.

Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. М.: Мир, 1967. 144 с.

Михлин В.М., Диков К.И., Стариков В.М. Эксплуатационная технологичность конструкции тракторов. М.: Машиностроение, 1982. 256 с.

Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. М.: Мир, 1969. 395 с.

Питухин А.В. Основы научных исследований. Петрозаводск: ПетрГУ, 2017. 72 с.

Питухин А.В., Шиловский В.Н., Скобцов И.Г., Кяльвияйнен В.А. Повышение эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин. Петрозаводск: Петропресс, 2012. 240 с.

Шиловский В.Н., Питухин А.В., Кяльвияйнен В.А., Костюкевич В.М. Сравнительная оценка эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 104 с.

Шиловский В.Н., Скобцов И.Г. Оценка влияния эксплуатационных факторов на ремонтпригодность машин лесного комплекса // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. СПб. 2019. Вып. 229. С. 164–175.

References

Amirov Yu.D., Alferova T.K., Volkov P.N. Tekhnologichnost' konstruktssii izdeliya: spravochnik. M.: Mashinostroenie, 1990. 768 p. (In Russ.)

Volkov P.N., Aristov A.I. Remontoprigochnost' mashin. M.: Mashinostroenie, 1975. 368 p. (In Russ.)

Gmurman V.E. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. M.: Vysshaya shkola Publ., 2003. 479 p. (In Russ.)

Ezekiel M., Fox K. Metody analiza korrelyatsii i regressii. M.: Statistika Publ., 1966. 560 p. (In Russ.)

Lawley D., Maxwell A. Faktornyj analiz kak statisticheskiy metod. M.: Mir, 1967. 144 p. (In Russ.)

Mikhlin M.V., Dikov K.I., Starikov V.M. Ekspluatatsionnaya tekhnologichnost' konstruktssii traktorov. M.: Mashinostroenie, 1982. 256 p. (In Russ.)

Hahn D., Shapiro S. Statisticheskie metody v inzhenernykh zadachakh. M.: Mir, 1967. 395 p. (In Russ.)

Pituhin A.V. Osnovy nauchnyh issledovaniy. Petrozavodsk: PetrGU, 2017. 72 p.

Pitukhin A.V., Shilovskij V.N., Skobtsov I.G., Kyalviyajnen V.A. Povyshenie ekspluatatsionnoj tekhnologichnosti lesozagotovitelnykh mashin. Petrozavodsk: Petroppress Publ., 2012. 240 p. (In Russ.)

Shilovskij V.N., Pitukhin A.V., Kyalviyajnen V.A., Kostyukevich V.M. Sravnitel'naya otsenka ekspluatatsionnoj tekhnologichnosti lesozagotovitelnykh mashin. Petrozavodsk: PetrGU, 2014. 104 p. (In Russ.)

Shilovskij V.N., Skobtsov I.G. Otsenka vliyaniya ekspluatatsionnykh faktorov na remontoprigochnost' mashin lesnogo kompleksa. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2019, iss. 229, pp. 164–175. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 01.12.2021

Шиловский В.Н., Скобцов И.Г., Конанов Д.Г. Оценка факторов эксплуатационной технологичности машин методом регрессионного анализа // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 240. С. 163–174. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.163-174

Работа посвящена оценке влияния эксплуатационных факторов на ремонтпригодность лесных машин. Цель работы заключается в обосновании и апробации порядка оценки факторов, определяющих ремонтпригодность транспортно-технологических машин, с использованием методов корреляции и регрессии. В первой части статьи представлен краткий обзор статистических методов анализа факторов эксплуатационной технологичности. Вторая часть статьи посвящена построению уравнения регрессии и определению значений коэффициентов в модели. В качестве факторов, определяющих продолжительность технических воздействий, приняты длительность эксплуатации лесных машин, стаж работы ремонтных рабочих и техническая оснащенность ремонтной базы. Связь между факторами и продолжительностью технических воздействий представлена в виде множественной линейной модели. В качестве показателей тесноты связи между исследуемыми переменными величинами использованы парные коэффициенты корреляции. Для определения коэффициентов регрессии линейной модели использована система нормальных уравнений. В третьей части статьи проведен анализ полученного уравнения регрессии. В качестве критерия правильности и полноты отбора факторов использован коэффициент детерминации. По полученной величине критерия был сделан вывод о достаточно высоком уровне полноты учета совокупности факторов, влияющих на продолжительность технического обслуживания и ремонта машин. Проведена проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии с использованием критерия Стьюдента. По результатам проверки все рассматриваемые факторы признаны значимыми для оценки продолжительности технических воздействий. Наибольшее влияние на продолжительность технических воздействий оказывает техническое состояние машины, зависящее от длительности её эксплуатации. Влияние стажа работы (квалификации) исполнителей и уровня оснащенности ремонтно-обслуживающей базы незначительно отличаются друг от друга, однако уровень оснащенности ремонтной базы является более значимым.

Ключевые слова: эксплуатационная технологичность, ремонтпригодность, фактор, регрессионный анализ, оценка, лесная машина.

Shilovsky V.N., Skobtsov I.G., Konanov D.G. Estimation of forest machine operational efficiency factors by regression analysis. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2022, iss. 240, pp. 164–174 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.163-174

The paper deals with the estimation of operational factors affecting forest machine maintainability. The main goal of this study is to substantiate and test the order of operational factors estimation using correlation and regression methods. A brief description of statistical methods of operational factor analysis is presented in the first part of the paper. The second part of the paper presents the obtained multiple regression equation and determined values of beta coefficients. Operation time of forest machine, staff employment period and servicing base technological infrastructure are accepted as independent variables determining servicing time. The interaction between independent variables and servicing time is presented as a multiple equation of linear regression. Pair correlation coefficients are used as indices of close linkage among the analyzed variable quantities. The system of normal equations is used to determine the regression coefficients of the linear model. The analysis of the obtained regression equation is given in the final part of the paper. The coefficient of determination is used as the accuracy and completeness criterion of factor selection. According to the obtained value of the criterion, it was concluded that the level of completeness of factor selection is sufficiently high. The statistical significance of regression coefficients is verified using Student's test. All considered factors are recognized as significant for servicing time estimation according to the results of verification. Furthermore, operation time of forest machine is recognized as the general maintenance factor affecting the duration of technical impacts. The effects of the staff employment period and the servicing base technological infrastructure differ slightly from each other; however, the servicing base technological infrastructure factor is more significant.

Key words: operational efficiency, maintainability, factor, regression analysis, estimation, forest machine.

ШИЛОВСКИЙ Вениамин Николаевич – профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Петрозаводского государственного университета, доктор технических наук, профессор. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2953-3770>.

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

SHILOVSKY Veniamin N. – DSc (Technical), professor of the Department of transport and technological machines and equipment, Petrozavodsk State University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2953-3770>.

185910. Lenin str. 33. Petrozavodsk. Russia. E-mail: shisvetnik@yandex.ru

СКОБЦОВ Игорь Геннадьевич – профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Петрозаводского государственного университета, доктор технических наук, доцент. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3106-1055>.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: iskobtsov@mail.ru

SKOBTSOV Igor G. – DSc (Technical), professor of the Department of transport and technological machines and equipment, Petrozavodsk State University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3106-1055>.

185910, Lenin str. 33, Petrozavodsk, Russia. E-mail: iskobtsov@mail.ru

КОНАНОВ Дмитрий Геннадьевич – преподаватель кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Петрозаводского государственного университета. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1994-1754>.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: konanovdmitry17@gmail.com

KONANOV Dmitriy G. – lecturer of the Department of transport and technological machines and equipment, Petrozavodsk State University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1994-1754>.

185910, Lenin str. 33, Petrozavodsk, Russia. E-mail: konanovdmitry17@gmail.com