

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6303

УДК 630.2

Статья

## Регрессионный анализ и оценка факторов ремонтпригодности лесных машин

**Шиловский Вениамин Николаевич**

*доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет  
(Российская Федерация), [shisvetnik@yandex.ru](mailto:shisvetnik@yandex.ru)*

**Скобцов Игорь Геннадьевич**

*доктор технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет  
(Российская Федерация), [iskobtsov@mail.ru](mailto:iskobtsov@mail.ru)*

**Конанов Дмитрий Геннадьевич**

*старший преподаватель кафедры транспортных и технологических машин и оборудования,  
Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация),  
[konanovdmity17@gmail.com](mailto:konanovdmity17@gmail.com)*

*Получена: 6 апреля 2022 / Принята: 17 июня 2022 / Опубликовано: 23 июня 2022*

---

**Аннотация:** 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 оснащённость 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 проведён 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 учёта 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 оснащённости ремонтно-обслуживающей базы незначительно отличаются друг от друга, однако уровень оснащённости ремонтной базы является более значимым.

**Ключевые слова:** эксплуатационная технологичность; линейная модель; регрессионный анализ; коэффициент детерминации; лесная машина

---

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6303

*Article*

## **Regression Analysis and Evaluation of Forest Machine Maintainability Factors**

**Veniamin Shilovsky**

*D. Sc. in engineering, professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
shisvetnik@yandex.ru*

**Igor Skobtsov**

*D. Sc. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
iskobtsov@mail.ru*

**Dmitriy Konanov**

*senior lecturer of the department of transport and technological machines and equipment,  
Petrozavodsk State University (Russian Federation), konanovdmitry17@gmail.com*

*Received: 4 April 2022 / Accepted: 17 June 2022 / Published: 23 June 2022*

---

**Abstract:** 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.

**Keywords:** operational efficiency; linear model; regression analysis; coefficient of determination; forest machine

---

## 1. 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 и, следовательно, снижением себестоимости получаемой продукции [1], [2]. Решение данной задачи возможно путём аналитического обобщения данных эксплуатации с использованием методов теории вероятностей и математической статистики [3—5].

Для оценки степени влияния эксплуатационных факторов на ремонтпригодность находят применение методы анализа корреляции и регрессии, имеющие глубокую историю своего развития [6], [7]. В задачи регрессионного анализа входит получение статистической модели, устанавливающей связь между, например, ремонтпригодностью как признаком ЭТ и факторами, определяющими величины показателей ремонтпригодности [8]. Значение интервала изменения рассматриваемых параметров определяет вид (порядок): при снижении величины интервала целесообразно применение линейного уравнения связи [9]. 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 [6]. В то же время значения коэффициентов регрессии зависят от полноты учёта совокупности факторов, определяющих изменчивость признака. Одним из критериев правильности и полноты отбора факторов является коэффициент детерминации  $R^2$  [7]. 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 [10].

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

## 2. Материалы и методы

Рассмотрим факторы ЭТ на примере лесозаготовительных машин (ЛЗМ), представив их в виде Дерева целей и задач оценки и улучшения ЭТ и повышения эффективности ЛЗМ (см. рисунок, где 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 ( $X_i$ ), определяющих продолжительность технических воздействий на транспортно-технологические машины:

- длительность эксплуатации машин ( $X_1$ );
- стаж работы ремонтных рабочих ( $X_2$ );
- техническая оснащённость 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 таблице 1.

**Таблица 1.** Величины среднестатистических значений исследуемых параметров

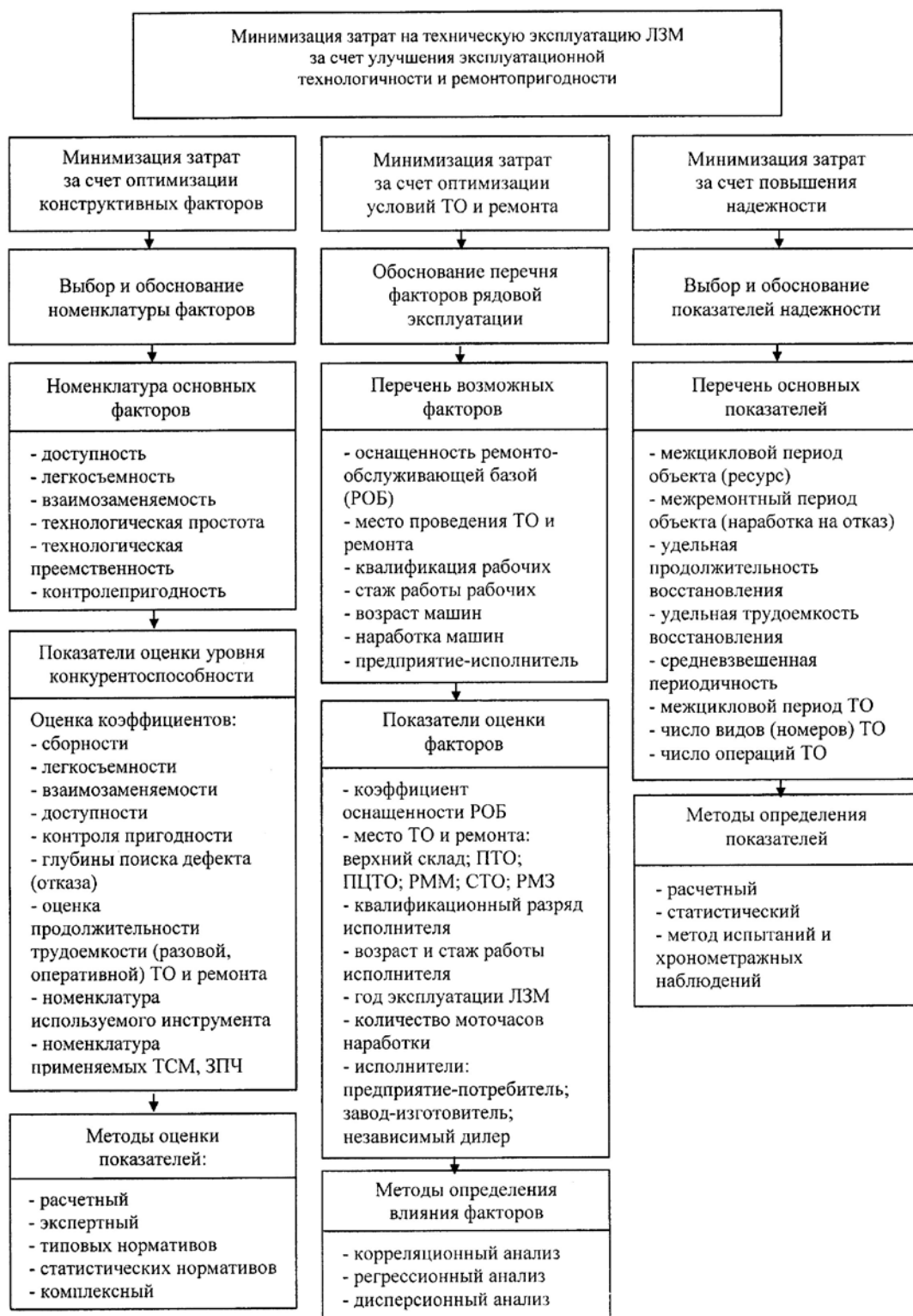
**Table 1.** The statistical values of research parameters

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 оснащённость ремонтной базы, $10^{-7}$ , тыс. руб	$X_3$	0,09	0,02 [ $S(X_3)$ ]
Продолжительность технических воздействий, ч	$Y$	3,10	0,70 [ $S(Y)$ ]

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

$$Y = C_0 + C_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot X_2 + C_3 \cdot X_3 + E, \quad (1)$$

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.



**Рисунок.** Дерево целей и задач по повышению эксплуатационной технологичности ЛЗМ

**Figure.** Aims and tasks tree for increasing forest machine operational efficiency

Статистические значения парных коэффициентов корреляции между величинами  $X_i$  и  $Y$  определяются по формуле [6]

$$r_{YX_i} = \frac{1}{nS(X)S(Y)} \sum_{u=1}^n (x_{iu} - \bar{X}_i)(y_u - \bar{Y}). \quad (2)$$

Коэффициенты корреляции между величинами  $X_i$  и  $X_j$  определяются по формуле

$$r_{X_i X_j} = \frac{1}{nS(X_i)S(X_j)} \sum_{u=1}^n (x_{iu} - \bar{X}_i)(x_{ju} - \bar{X}_j), \quad (3)$$

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

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_u y_u, \quad \bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_u x_{iu}, \quad \bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_u x_{ju}; \quad (4)$$

$S(Y)$ ,  $S(X_i)$ ,  $S(X_j)$  — оценки средних квадратических отклонений случайных величин  $Y$ ,  $X_i$  и  $X_j$ ;

$$S(Y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_u - \bar{Y})^2},$$

$$S(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (x_{iu} - \bar{X}_i)^2}, \quad (5)$$

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

### 3. Результаты

В результате расчётов получены значения коэффициентов парной корреляции, представленные в таблице 2.

**Таблица 2.** Величины коэффициентов парной корреляции

**Table 2.** Values of pair correlation coefficients

Факторы	$Y$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$X_1$	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 [10]:

$$t_Y = d_1 \cdot t_{X_1} + d_2 \cdot t_{X_2} + d_3 \cdot t_{X_3}, \quad (6)$$

где  $t_Y = \frac{Y - \bar{Y}}{S(Y)}$ ;  $t_{X_i} = \frac{X_i - \bar{X}_i}{S(X_i)}$ .

Система нормальных уравнений, используемая для определения значений коэффициентов регрессии, имеет вид: [7]

$$\begin{aligned} r_{YX_1} &= d_1 + d_2 \cdot r_{X_2X_1} + d_3 \cdot r_{X_3X_1}, \\ r_{YX_2} &= d_1 \cdot r_{X_1X_2} + d_2 + d_3 \cdot r_{X_3X_2}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$r_{YX_3} = d_1 \cdot r_{X_1X_3} + d_2 \cdot r_{X_2X_3} + d_3.$$

Значения оценок  $d_i$  находятся методом определителей, для чего вычисляем определитель  $\Delta(R_m)$ , когда  $m = 4$  ( $m = k + 1$ , где  $k = 3$ , т. е. отражает число факторов) [10].

Определитель системы нормальных уравнений:

$$\Delta(R_4) = \begin{vmatrix} 1,00 & 0,03 & 0,18 \\ 0,03 & 1,00 & 0,33 \\ 0,18 & 0,33 & 1,00 \end{vmatrix} = 0,86. \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta_1(R_4) &= \begin{vmatrix} 0,56 & 0,03 & 0,18 \\ 0,30 & 1,00 & 0,33 \\ 0,37 & 0,33 & 1,00 \end{vmatrix} = 0,44; \\ \Delta_2(R_4) &= \begin{vmatrix} 1,00 & 0,56 & 0,18 \\ 0,03 & 0,30 & 0,33 \\ 0,18 & 0,37 & 1,00 \end{vmatrix} = 0,19; \\ \Delta_3(R_4) &= \begin{vmatrix} 1,00 & 0,03 & 0,56 \\ 0,03 & 1,00 & 0,30 \\ 0,18 & 0,33 & 0,37 \end{vmatrix} = 0,18. \end{aligned} \quad (9)$$

Значения оценок стандартизированных коэффициентов:

$$d_1 = \frac{\Delta_1(R_4)}{\Delta(R_4)} = \frac{0,44}{0,86} = 0,51; \quad d_2 = \frac{\Delta_2(R_4)}{\Delta(R_4)} = \frac{0,19}{0,86} = 0,22; \quad d_3 = \frac{\Delta_3(R_4)}{\Delta(R_4)} = \frac{0,18}{0,86} = 0,21. \quad (10)$$

Определим величины коэффициентов регрессии в натуральном масштабе [6]:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= d_1 \frac{S(Y)}{S(X_1)} = 0,51 \cdot \frac{0,70}{3,00} = 0,12; \\
 b_2 &= d_2 \frac{S(Y)}{S(X_2)} = 0,22 \cdot \frac{0,70}{0,01} = 15,40; \\
 b_3 &= d_3 \frac{S(Y)}{S(X_3)} = 0,21 \cdot \frac{0,70}{0,02} = 7,35;
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

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

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

$$Y = 0,12 + 0,12 \cdot X_1 + 15,40 \cdot X_2 + 7,35 \cdot X_3 . \tag{11}$$

Для оценки полноты отобранных факторов определим величину множественного коэффициента корреляции и коэффициента детерминации [6].

Коэффициент корреляции

$$R_{Y \times X_1 X_2 X_3} = \sqrt{d_1 \cdot r_{YX_1} + d_2 \cdot r_{YX_2} + d_3 \cdot r_{YX_3}} = \sqrt{0,51 \cdot 0,56 + 0,22 \cdot 0,30 + 0,21 \cdot 0,37} = 0,65 . \tag{12}$$

Коэффициент детерминации

$$R_{Y \times X_1 X_2 X_3}^2 = 0,65^2 = 0,43 . \tag{13}$$

Следовательно, изменчивость продолжительности ремонта обусловлена действием рассматриваемых факторов на 43 %, а остальная часть — действием неучтённых факторов. Для оценки значимости рассматриваемых факторов проведём дисперсионный анализ [12]:

Определим дисперсии коэффициентов регрессии:

$$S(b_0) = \frac{S(Y)}{\sqrt{n}} = \frac{0,70}{\sqrt{175}} = 0,053 . \tag{14}$$

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

$$\begin{aligned}
 R_{X_1 \times X_2 X_3} &= \frac{r_{X_1 X_2}^2 + r_{X_1 X_3}^2 - 2r_{X_1 X_2} \cdot r_{X_1 X_3} \cdot r_{X_2 X_3}}{1 - r_{X_2 X_3}^2} = \frac{0,03^2 + 0,18^2 - 2 \cdot 0,03 \cdot 0,18 \cdot 0,33}{1 - 0,33^2} = 0,033; \\
 R_{X_2 \times X_1 X_3} &= \frac{r_{X_1 X_2}^2 + r_{X_2 X_3}^2 - 2r_{X_1 X_2} \cdot r_{X_1 X_3} \cdot r_{X_2 X_3}}{1 - r_{X_1 X_3}^2} = \frac{0,03^2 + 0,33^2 - 2 \cdot 0,03 \cdot 0,18 \cdot 0,33}{1 - 0,18^2} = 0,11; \tag{15}
 \end{aligned}$$

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

Тогда значения средних квадратичных отклонений коэффициентов регрессии равны:

$$\begin{aligned} S(b_1) &= \frac{S(Y)}{\sqrt{n}S(X_1)} \cdot \frac{\sqrt{1 - R_{Y \times X_1 X_2 X_3}^2}}{\sqrt{1 - R_{X_1 \times X_2 X_3}^2}} = \frac{0,70}{\sqrt{175} \cdot 3,00} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,65^2}}{\sqrt{1 - 0,033^2}} = 0,014; \\ S(b_2) &= \frac{S(Y)}{\sqrt{n}S(X_2)} \cdot \frac{\sqrt{1 - R_{Y \times X_1 X_2 X_3}^2}}{\sqrt{1 - R_{X_2 \times X_1 X_3}^2}} = \frac{0,70}{\sqrt{175} \cdot 0,01} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,65^2}}{\sqrt{1 - 0,11^2}} = 4,03; \\ S(b_3) &= \frac{S(Y)}{\sqrt{n}S(X_3)} \cdot \frac{\sqrt{1 - R_{Y \times X_1 X_2 X_3}^2}}{\sqrt{1 - R_{X_3 \times X_1 X_2}^2}} = \frac{0,70}{\sqrt{175} \cdot 0,02} \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,65^2}}{\sqrt{1 - 0,14^2}} = 1,61. \end{aligned} \quad (16)$$

Значимость коэффициентов регрессии проверим по критерию Стьюдента при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $f = n - 1 = 174$ . Значение квантиля распределения Стьюдента  $t_{0,95;174} = 1,97$  [10].

Тогда

$$\begin{aligned} t_{b_0} &= \frac{b_0}{S(b_0)} = \frac{0,12}{0,053} = 2,26 > t_{0,95;174} = 1,97; \\ t_{b_1} &= \frac{b_1}{S(b_1)} = \frac{0,12}{0,014} = 8,57 > t_{0,95;174} = 1,97; \\ t_{b_2} &= \frac{b_2}{S(b_2)} = \frac{15,40}{4,03} = 3,82 > t_{0,95;174} = 1,97; \\ t_{b_3} &= \frac{b_3}{S(b_3)} = \frac{7,35}{1,61} = 4,57 > t_{0,95;174} = 1,97. \end{aligned} \quad (17)$$

#### 4. Обсуждение и заключение

1. Получена множественная линейная модель, связывающая продолжительность технических воздействий с рядом факторов: длительностью эксплуатации лесных машин, стажем работы ремонтных рабочих и технической оснащённостью ремонтной базы.

2. 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 оснащённости ремонтно-обслуживающей базы незначительно отличаются друг от друга, однако уровень оснащённости ремонтной базы является более значимым.

### Список литературы

1. Сравнительная оценка эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин, В. А. Кяльвийнен, В. М. Костюкевич. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 104 с.
2. Gulyarenko A. A. Calculation Method of the Reasonable Reliability Level Based on the Cost Criteria // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Vol. 47, is. 1. P. 96—103.
3. Shilovsky V. N., Skobtsov I. G., Pitukhin E. A. Mathematical model of Multi- item Spare Parts Reservation // *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering* Springer, Cham. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9-48>. Text. Image: electronic.
4. Shilovsky V. N., Pitukhin E. A., Skobtsov I. G. Technigue for Improving the Organization of Maintenance of Transport and Technological Science // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 666. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/666/6/062089>. Text. Image: electronic.
5. Shilovsky V. N., Pitukhin E. A., Skobtsov I. G. Algorithm for the Development and Delivery of a Multi-Item Set of Spare Parts and Maintenance Supplies for Geographically Dispersed Consumers // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/8/082031>. Text. Image: electronic.
6. Lawley D., Maxwell A. Factor analysis as a statistical method. London: Butterworths Publ., 1963. 144 p.
7. Hahn G., Shapiro S. Statistical models in engineering. New York: John Wiley & Sons Publ., 1967. 395 p.
8. Амиров Ю. Д., Алферова Т. К., Волков П. Н. Технологичность конструкции изделия: Справочник. М.: Машиностроение, 1990. 768 с.
9. Волков П. Н., Аристов А. И. Ремонтпригодность машин. М.: Машиностроение, 1975. 368 с.
10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 2003. 479 с.
11. Питухин А. В. Основы научных исследований. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2017. 72 с.
12. Шиловский В. Н., Скобцов И. Г. Оценка влияния эксплуатационных факторов на ремонтпригодность машин лесного комплекса // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2019. Vol. 229. С. 164—175.

### References

1. Shilovsky V. N., Pitukhin A. V., Kyalviyaynen V. A., Kostyukevich V. M. *Comparative assessment of exploitation technological efficiency of forest machines*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2014. 104 p. (In Russ.)
2. Gulyarenko A. A. Calculation Method of the Reasonable Reliability Level Based on the Cost Criteria. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, vol. 47, is. 1, pp. 96—103.
3. Shilovsky V. N., Skobtsov I. G., Pitukhin E. A. Mathematical model of Multi- item Spare Parts Reservation. *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical*

- Engineering Springer, Cham*, 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9-48>. Text. Image: electronic.
4. Shilovsky V. N., Pitukhin E. A., Skobtsov I. G. Technigue for Improving the Organization of Maintenance of Transport and Technological Science. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 666. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/666/6/062089>. Text. Image: electronic.
  5. Shilovsky V. N., Pitukhin E. A., Skobtsov I. G. Algorithm for the Development and Delivery of a Multi-Item Set of Spare Parts and Maintenance Supplies for Geographically Dispersed Consumers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 753. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/8/082031>. Text. Image: electronic.
  6. Lawley D., Maxwell A. *Factor analysis as a statistical method*. London, Butterworths Publ., 1963. 144 p.
  7. Hahn G., Shapiro S. *Statistical models in engineering*. New York, John Wiley & Sons Publ., 1967. 395 p.
  8. Amirov Y. D., Alferova T. K., Volkov P. N. *Technological efficiency of product design: reference book*. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 768 p. (In Russ.)
  9. Volkov P. N., Aristov A. I. *Maintainability of machines*. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 368 p. (In Russ.)
  10. Gmurman V. E. *Probability theory and mathematical statistics*. Moscow, Vyssh. shk., 2003. 479 p. (In Russ.)
  11. Pituhin A. V. *Fundamentals of scientific research*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2017. 72 p. (In Russ.)
  12. Shilovsky V. N., Skobtsov I. G. The estimation of operational factors affecting forest machine maintainability. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2019, vol. 229, pp. 164—175. (In Russ.)