

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 630*32

В.Н. Шиловский, Г.Ю. Гольштейн, Д.Г. Конанов

ОЦЕНКА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИСПОСОБЛЕННОСТИ МАШИН К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ

Введение. Эксплуатационная технологичность лесозаготовительных машин (ЛЗМ) определяется соответствующими показателями оценки приспособленности к техническому, технологическому обслуживанию и текущему ремонту (ТР) [Гольштейн, 2008; Шиловский и др., 2008; Питухин и др., 2012].

Техническое обслуживание (ТО) наряду с уборочными, смазочно-очистительными, крепежными и регулировочными работами содержит диагностические работы, определяющие номенклатуру и объемы ремонтных работ для устранения параметрических (функциональных) отказов ЛЗМ [Гольштейн, 2008; Шиловский и др., 2008].

Цель статьи: формирование показателей оценки приспособленности ЛЗМ к техническому диагностированию, методика оценки (наличия) параметрического отказа по результатам диагностирования.

Основные понятия. Показатели оценки приспособленности машин к ТО делятся на основные и вспомогательные [Гольштейн, 2008; Шиловский и др., 2008; Питухин и др., 2012; Шиловский, 2017].

Основные [Амиров и др., 1990; Михлин и др., 1982]; ГОСТ 15.000–82:

1) средняя суммарная оперативная трудоемкость (чел.-ч) определяется по всем видам ТО за цикл периодичности ТО, например, за цикл 900 или 2000 мото-ч;

2) удельная суммарная оперативная трудоемкость ТО, приведенная к одному моточасу.

Дополнительные (ГОСТ 15.000–82; ГОСТ 28.001–83):

1) коэффициент доступности (K_d):

$$K_d = \frac{S_{\text{ТО}_0}}{S_{\text{ТО}_0} + S_{\text{ТО}_B}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{Тоо}}$ – трудоемкость основных операций; $S_{\text{Тов}}$ – трудоемкость вспомогательных операций;

2) коэффициент ассортимента топливно-смазочных материалов ($K_{\text{а.т.с}}$):

$$K_{\text{а.т.с}} = \frac{J_M}{M + C_M}, \quad (2)$$

где J_M – минимально необходимое число сортов масел и смазочных материалов; M – число сортов масел, применяемых на машине; C_M – число сортов смазочных материалов, применяемых на машине;

3) коэффициент унификации инструмента ($K_{\text{ун}}$):

$$K_{\text{ун}} = \frac{N_{\text{ун}}}{N_{\text{ун}} + N_{\text{сп}}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{ун}}$ – число унифицированного инструмента; $N_{\text{сп}}$ – число специального инструмента.

Работы по обеспечению приспособленности машин к диагностированию выполняются в определенной последовательности с учетом стадий их разработки [Шиловский, 2017; Амиров и др., 1990; Михлин и др., 1982]:

1. На стадии «Техническое задание» устанавливают требования к контролепригодности. Отражаются значения основных и дополнительных показателей приспособленности к диагностированию на основе данных о контролепригодности лучших отечественных и зарубежных машин.

2. На стадии «Техническое предложение» обосновывают выбранные варианты конструктивных решений по контролепригодности.

3. На стадии «Эскизный проект» анализируют принципиальные решения по обеспечению приспособленности машины к диагностированию, уточняя показатели ремонтпригодности.

4. На стадии «Технический проект» принимают окончательное решение по обеспечению приспособленности машины к диагностированию, определению номенклатуры, характера и числа типовых элементов контроля (ТЭК).

5. На стадии «Разработка рабочей документации» окончательно отрабатывают конструкцию машины по приспособленности к диагностированию.

Приспособленность к диагностированию и самодиагностирование позволяют определить параметрические отказы и не эксплуатировать машину за пределами доходной ставки [Гольштейн, 2008; Шиловский и др., 2008].

Показатели приспособленности машин к диагностированию, методика определения параметрического отказа. Показатели приспособленности к техническому диагностированию включают основной и дополнительные показатели [Шиловский, 2017; Амиров и др., 1990].

Основной показатель – удельная оперативная трудоемкость диагностирования (в чел.-ч/мото.-ч):

$$S_A = \frac{S_d}{T_3}, \quad (4)$$

где S_A – средняя суммарная оперативная трудоемкость за цикл периодичности ТО, чел.-ч; T_3 – наработка машины за цикл периодичности ТО, мото.-ч.

Дополнительные:

1) коэффициент доступности (K_d):

$$K_d = \frac{t_{до}}{t_d}, \quad (5)$$

где $t_{до}$ – основная трудоемкость непосредственного диагностирования; t_d – оперативная трудоемкость основной и вспомогательной операции ($t_{дв}$)

$$t_d = t_{до} + t_{дв}; \quad (6)$$

2) коэффициент обеспеченности типовыми элементами для контроля (K_o):

$$K_o = P_i / P, \quad (7)$$

где P_i – число диагностических параметров, для измерения которых имеются типовые элементы контроля (ТЭК); P – число диагностических параметров, которые надо измерять при диагностировании;

3) коэффициент унификации типовых элементов для контроля (M_y):

$$M_y = M_1 / M, \quad M_y = M_1 / M, \quad (8)$$

где M_1 – число ТЭК машины, унифицированных с соответствующими базовыми ТЭК; M – общее число ТЭК машины;

4) коэффициенты полноты проверки работоспособности (K_{mn}):

$$K_{mn} = (1 - g) \frac{(1 - g)}{(1 - g_i)}, \quad (9)$$

где g – вероятность отказа этой группы сложности всех составных частей машины за этот же период; g_i – вероятность отказа заданной группы сложности диагностируемых составных частей машины за определенный период.

Сопряжения эксплуатируемых машин требуют восстановления, ремонтных воздействий после того, как предельно снизится фактическая грузоподъемность, производительность технологического оборудования и машины в целом. Таким образом, объемы технических воздействий определяются количеством не только функциональных, но и параметрических отказов, которые определяются по результатам диагностирования, согласно установленным критериям предельного состояния сопряжения по экономическим или технологическим факторам.

Рассмотрим влияние снижения проверяемой при диагностировании компрессии, а значит и эффективной мощности двигателя на экономическую выгодность (прибыльность) работы лесотранспортной машины. С этой целью проследим зависимость себестоимости $1 \text{ м}^3 \cdot \text{км}$. или $1 \text{ т} \cdot \text{км}$. от фактической грузоподъемности машины.

Расчетную себестоимость перевозки (C_p) представим в виде выражения, включающего прогнозируемые или эмпирические параметры:

$$C_p = \frac{1}{QK_d K_n} \left(C_{\text{пер}} + \frac{C_{\text{пост}} (L_r + V_T \Delta t K_n)}{L_r} \right), \quad (10)$$

где $C_{\text{пер}}$, $C_{\text{пост}}$ – сумма соответственно переменных и постоянных расходов, приходящихся на 1 км пробега транспортной машины, руб./км; Q – фактическая грузоподъемность машины (масса перевозимого груза), т (м^3); K_d – коэффициент динамического использования грузоподъемности; K_n – коэффициент использования пробега; L_r – средняя длина ездки с грузом, км; V_T – техническая скорость, км/ч; Δt – время простоя машины при погрузке и разгрузке за одну ездку, ч.

Формула производительности лесотранспортной машины включает расчетные или эмпирические дискретные параметры:

$$V_ч = \frac{QK_d L_r K_n V_T}{L_r + K_n V_T \Delta t}, \quad (11)$$

где $V_ч$ – часовая производительность машины, т·км/ч ($\text{м}^3 \cdot \text{км}/\text{ч}$).

Располагая показателями работы лесотранспортной машины, можно рассчитать себестоимость $1 \text{ т} \cdot \text{км}$ ($\text{м}^3 \cdot \text{км}$) при различных значениях грузоподъемности, снижающейся по причине потери мощности двигателя от износа цилиндропоршневой группы, т.е. снижения компрессии, выявляемой при диагностировании.

Путем расчетов теоретического эксперимента вычислим себестоимость $1 \text{ т} \cdot \text{км}$ ($\text{м}^3 \cdot \text{км}$) с учетом снижения фактической грузоподъемности лесотранспортной машины.

Исходные данные: $Q = 8$ т; $V_T = 21$ км/ч; $K_d = 1,0$; $K_n = 0,5$; $C_{пер} = 3,574$ руб./км; $C_{пост} = 30$ руб./км; $\Delta t = 0,7$ ч; $L_T = 15$ км.

Для десяти различных значений фактической грузоподъемности лесотранспортной машины себестоимость 1 т.км представлена в таблице.

Значения расчетной себестоимости грузоперевозки в зависимости от снижения массы фактически перевозимого груза

Values of the estimated cost of transportation, depending on the reduction in the mass of the actually transported cargo

| Фактическая грузоподъемность Q , кг | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8000 | 7200 | 6400 | 5600 | 4800 | 4000 | 3200 | 2400 | 1600 | 800 |
| Себестоимость 1 т.км (C_p), руб./т.км, соответствующая фактической грузоподъемности | | | | | | | | | |
| 5,70 | 6,38 | 7,18 | 8,22 | 9,24 | 11,00 | 13,36 | 18,24 | 27,52 | 55,04 |

В общем виде величина прибыли (Π) определяется по выражению:

$$\Pi = \text{Ц} - \text{С}, \quad (12)$$

где Ц – рыночная цена перевозки (оплата заказчика); С – себестоимость перевозки груза.

Данные численного примера показывают, что себестоимость перевозки 1 т груза возрастает при снижении фактической грузоподъемности транспортного средства, т. е. массы перевозимого груза.

Добываясь прибыли от эксплуатации лесотранспортной машины, нельзя допускать, чтобы себестоимость 1 т.км была бы выше доходной ставки, т.е. выше значения расчетной себестоимости, равного 7,18 руб./т.км. (C_d). При превышении доходной ставки из-за снижения грузоподъемности, возникает состояние параметрического отказа, требующего своего устранения (ремонта), что должно показать своевременное диагностирование.

Стратегия планирования диагностирования технического состояния сопряжений основывается на балансе потерь стоимости проверок от обнаружения параметрического отказа и от неоправданного простоя машины в течение осуществления диагностических операции.

Организация проверок через постоянный период времени определяет периодическую стратегию проверок. Проведение проверок с переменным интервалом определяет последовательные стратегии [Гольштейн, 2008; Шиловский и др., 2014; Шиловский и др., 2015].

В начале эксплуатации может быть выбрана периодическая стратегия проверок. С течением времени эксплуатации, когда состояние сопряжений приближается к предельному состоянию по экономическому критерию, периодичность проверок должна сокращаться, чтобы не пропустить момент наступления параметрического отказа.

При организации проверок через постоянный интервал τ величина полных ожидаемых эксплуатационных потерь $M[\Pi_3]$ равна:

$$M[\Pi_3] = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{k\tau}^{(k+1)\tau} \{(k+1)C_1 + C_2[(k+1)\tau - x]\} dF(x), \quad (13)$$

где $F(x)$ – распределение времени до первого параметрического отказа сопряжения; C_1, C_2 – соответственно фиксированная стоимость k -й проверки и стоимости одного часа простоя машины, руб./ч.

При неизвестном законе распределения $F(t)$ предлагаются последовательно-периодические стратегии проверок с периодом T , имеющим конечное значение. Возникающие во времени эксплуатационные потери Q в случайные моменты времени (x) из-за возникновения параметрического отказа между k -й ($k+1$)-й проверками ($k=0, 1, \dots, n-1$) равны:

$$Q(x) = \begin{cases} (k+1)C_1 + C_2(t_{k+1} - x), & \text{если } t_k < x \leq t_{k+1} (k=0, 1, \dots, n-1); \\ nC_1 + C_2(T - x), & \text{если } t_n < x \leq T; \\ nC_1, & \text{если } x > T. \end{cases} \quad (14)$$

Ввиду того, что параметрический отказ сопряжения может возникнуть в любой момент времени в заданном интервале, или не возникнуть вообще за время $[0, T]$, то полные ожидаемые потери ($M[\Pi_3(T)]$) за это время будут равны:

$$M[\Pi_3(T, F, n)] = \sum_{k=0}^{n-1} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \{(k+1)C_1 + C_2(t_{k+1} - x)\} dF(x) + \int_{t_n}^T \{nC_1 + C_2(T - x)\} dF(x) + nC_1 \int_T^{\infty} dF(x). \quad (15)$$

Заключение. В результате выполнения работы получены следующие итоги:

1. Представлен порядок обеспечения конкурентоспособной приспособленности к диагностированию машин на стадии их разработки.
2. Освещены показатели, характеризующие и позволяющие дать сравнительную оценку приспособленности ЛЗМ к диагностированию.

3. Разработана методика обоснования критерия параметрического отказа, выявляемого по результатам диагностирования.

4. Обоснована методика определения экономически рациональной периодичности диагностирования технического состояния сопряжений с целью своевременного выявления параметрического отказа.

Библиографический список

Амиров Ю.Д., Алферова Т.К., Волков П.Н. и др. Технологичность конструкций изделия: справочник / под ред. Ю.Д. Амирова: 2-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1990. 768 с.

Гольштейн Г.Ю. К вопросу обоснования параметрического отказа гидропривода технологического оборудования трелевочного трактора // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2008. Вып. 7. С. 29–31.

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

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

Шиловский В.Н. Инновационный менеджмент производства машин и технического сервиса. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2017. 59 с.

Шиловский В.Н., Гольштейн Г.Ю. Теоретические основы обоснования периодичности диагностики гидроагрегатов технологического оборудования лесных машин // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2008. Вып. 7. С. 147–148.

Шиловский В.Н., Питухин А.В., Костюкевич В.М. Маркетинг и менеджмент технического сервиса машин и оборудования. СПб.: Лань, 2015. 272 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.

References

Amirov Ju.D., Alferova T.K., Volkov P.N. et al. Tehnologichnost' konstrukcij izdelija: spravochnik / pod red. Ju.D. Amirova: 2-e izd., dop. I pererab. M.: Mashinostroenie, 1990. 768 p. (In Russ.)

Gol'shtejn G.Ju. K voprosu obosnovanija parametricheskogo otkaza gidroprivoda tehnologicheskogo oborudovanija trelevochnogo traktora. *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU*, 2008, iss. 7, pp. 29–31. (In Russ.)

Mihlin V.M., Dikov K.I., Starikov V.M. et al. Jekspluatacionnaja tehnologichnost' konstrukcij traktorov. M.: Mashinostroenie, 1982. 256 p. (In Russ.)

Pituhin A.V., Shilovskij V.N., Skobcov I.G., Kjal'vijajnen V.A. Povyshenie jekspluatacionnoj tehnologichnosti lesozagotovitel'nyh mashin. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2012. 240 p. (In Russ.)

Shilovskij V.N. Innovacionnyj menedzhment proizvodstva mashin i tehničeskogo servisa. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2017. 59 p. (In Russ.)

Shilovskij V.N., Gol'shtejn G.Ju. Teoreticheskie osnovy obosnovanija periodičnosti diagnostiki gidroagregatov tehnologičeskogo oborudovanija lesnyh mashin. Trudy lesoinženerenogo fakul'teta PetrGU, 2008, iss. 7, pp. 147–148. (In Russ.)

Shilovskij V.N., Pituhin A.V., Kjal'vijajnen V.A., Kostjukevich V.M. Sravnitel'naja ocenka jekspluatacionnoj tehnologičnosti lesozagotovitel'nyh mashin. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2014. 104 p. (In Russ.)

Shilovskij V.N., Pituhin A.V., Kostjukevich V.M. Marketing i menedzhment tehničeskogo servisa mashin i oborudovanija. SPb.: Lan', 2015. 272 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 01.10.2021

Шиловский В.Н., Гольштейн Г.Ю., Конанов Д.Г. Оценка и обеспечение приспособленности машин к диагностированию по определению параметрических отказов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 131–140. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.131-140

Во время эксплуатации лесозаготовительных машин выполняются плановые проверки и техническое обслуживание в соответствии с нормативно-технической документацией с целью поддержания исправного состояния в течение всего периода эксплуатации. При достижении определенного ресурса машин возникают неисправности, которые могут накапливаться и вызывать снижение производительности. Для выявления таких неисправностей выполняется техническое диагностирование с целью более раннего выявления неисправностей, которые могут вызвать снижение производительности и, как следствие, привести к преждевременным простоям. Для выполнения оценки приспособленности машин к техническому обслуживанию необходимо учитывать такие показатели, как коэффициент доступности, ассортимента топлива смазочных материалов, унификации инструмента. При выполнении технического обслуживания существует вероятность перехода технического состояния машин в неисправное вследствие наступления не только функциональных отказов, но и параметрических. Обеспечение приспособленности машин к диагностированию необходимо формировать с учетом стадий разработки, что позволяет выявлять отказы и обеспечить эксплуатацию машины выше уровня доходной ставки. В статье на примере снижения компрессии двигателя лесотранспортной машины представлена зависимость себестоимости от грузоподъемности. В случае повышения

себестоимости выше уровня доходной ставки из-за снижения грузоподъёмности, возникает состояние неисправной работы, которое характеризуется параметрическим отказом. Для предотвращения параметрического отказа необходимо своевременное диагностирование. Периодичность диагностических работ должна быть оптимальной, чтобы снизить эксплуатационные потери. Определение полных эксплуатационных потерь представлено в виде зависимостей возникновения параметрического отказа через постоянный интервал времени и в случайные моменты при неизвестном законе распределения, а также, если отказы могут не возникнуть вообще.

Ключевые слова: диагностирование, приспособленность, показатели, параметрический отказ.

Shilovsky V.N., Golshtein G.Y., Konanov D.G. Evaluating machine suitability for diagnostics by determining parametric failures. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2022, iss. 239, pp. 131–140 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.131-140

During the operation of logging machines, scheduled inspections and maintenance are carried out in accordance with regulatory and technical documentation in order to maintain a serviceable condition throughout the entire period of operation. When a certain resource of machines is reached, malfunctions occur, which can accumulate and cause a decrease in performance. To identify such malfunctions, technical diagnostics are performed in order to identify malfunctions earlier, which can cause a decrease in productivity and, as a result, lead to premature downtime. To assess the fitness of machines for maintenance, it is necessary to take into account such indicators as the availability coefficient, the range of fuel lubricants, and the unification of tools. When performing maintenance, there is a possibility of the technical condition of the machines becoming faulty due to the occurrence of not only functional failures, but also parametric ones. Ensuring the fitness of machines for diagnostics must be formed taking into account the stages of development, which allows you to identify failures and ensure the operation of the machine above the level of the revenue rate. In the article, the dependence of the cost price on the load capacity is presented by the example of reducing the compression of the engine of a forest transport vehicle. In the case of an increase in the cost price above the level of the income rate due to a decrease in load capacity, a state of malfunction occurs, which is characterized by a parametric failure. Timely diagnosis is necessary to prevent parametric failure. The frequency of diagnostic work should be optimal in order to reduce operational losses. The definition of total operational losses is presented in the form of dependencies of the occurrence of a parametric failure at a constant time interval and at random moments with an unknown distribution law, as well as if failures may not occur at all.

Key words: diagnosis, fitness, indicators, parametric failure.

ШИЛОВСКИЙ Вениамин Николаевич – профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Петрозаводского государственного университета, доктор технических наук. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1068-690X>, Scopus Author ID: 57211200640

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

SHILOVSKY Veniamin N. – DSc (Technical), Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Equipment, Petrozavodsk State University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1068-690X>, Scopus Author ID: 57211200640

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Republic of Karelia. Russia. E-mail: shisvetnik@narod.ru

ГОЛЬШТЕЙН Григорий Юрьевич – доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Петрозаводского государственного университета, кандидат технических наук. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5296-4854>, Scopus Author ID: 57222158870

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия.
E-mail: grigory@psu.karelia.ru

GOLSHEIN Grigory Yu. – PhD (Technical), Associate Professor of Technical Sciences, Department of Transport and Technological Machines and Equipment, Petrozavodsk State University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5296-4854>, Scopus Author ID: 57222158870

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Republic of Karelia. Russia. E-mail: grigory@psu.karelia.ru

КОНАНОВ Дмитрий Геннадьевич – аспирант, 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, Республика Карелия, Россия.
E-mail: konanovdmitry17@gmail.com

KONANOV Dmitry G. – PhD student, lecturer at the Department of Transport and Technological Machines and Equipment, Petrozavodsk State University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1994-1754>

185910. Lenin av. 33. Petrozavodsk. Republic of Karelia. Russia. E-mail: konanovdmitry17@gmail.com