

ВЕНИАМИН НИКОЛАЕВИЧ ШИЛОВСКИЙдоктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета ПетрГУ
tmir@psu.karelia.ru**ГРИГОРИЙ ЮРЬЕВИЧ ГОЛЬШТЕЙН**аспирант кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета ПетрГУ
tmir@psu.karelia.ru**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОТКАЗА
ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ**

В статье предложены методические подходы, математические модели по экономическому обоснованию критериев параметрических отказов, периодичности диагностики сопряжений лесозаготовительных машин.

Ключевые слова: параметрический отказ, экономический критерий, периодичность диагностики

Добиваясь рентабельной работы лесозаготовительной машины (ЛЗМ), нельзя допускать, чтобы себестоимость единицы производимой ею продукции была выше доходной ставки.

Сопряжения ЛЗМ требуют восстановления, ремонтных воздействий после достижения предельного снижения фактической грузоподъемности, производительности технологического оборудования и машины в целом.

Рассмотрим влияние снижения эффективной мощности на экономическую эффективность лесотранспортной машины. С этой целью проследим изменение себестоимости $1 \text{ м}^3 \cdot \text{км}$ или $1 \text{ т} \cdot \text{км}$ от снижения фактической грузоподъемности ЛЗМ.

Расчетную себестоимость перевозки (C_p) представим, согласно работе [2], в виде выражения, включающего прогнозируемые или дискретные эмпирические параметры:

$$C_p = \frac{1}{Q \cdot K_d \cdot K_H} \left(C_{\text{пер}} + \frac{C_{\text{пост}} (L_r + V_T \cdot \Delta t \cdot K_H)}{L_r} \right), \quad (1)$$

где $C_{\text{пер}}$, $C_{\text{пост}}$ – сумма соответственно переменных и постоянных расходов, приходящихся на 1 км пробега лесотранспортной машины, руб./км ; Q – фактическая грузоподъемность машины (масса перевозимого груза), т (м^3); K_d – коэффициент динамического использования грузоподъемности; K_H – 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 . Изменение грузоподъемности машины (манипулятора) происходит из-за снижения мощности (производительности) двигателя (гидронасоса).

На производительность лесотранспортной машины влияет ряд факторов, с учетом которых выражение расчетной производительности лесотранспортной машины может быть представлено в виде выражения, включающего расчетные или эмпирические дискретные параметры:

$$V_u = \frac{Q \cdot K_d \cdot L_r \cdot K_H \cdot V_T}{L_r + K_H \cdot V_T \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

где V_q – часовая производительность машины, $т \cdot км/ч$ ($м^3 \cdot км/ч$).

Располагая показателями работы лесотранспортной машины, можно рассчитать себестоимость $1т \cdot км$ ($м^3 \cdot км$) при различной ее фактической грузоподъемности, снижающейся в эксплуатации по причине потери мощности двигателя от износа деталей.

На основе теоретического эксперимента произведем расчет себестоимости $1т \cdot км$ в зависимости от снижения фактической грузоподъемности лесотранспортной машины и определим критическую величину массы перевозимого груза, дальнейшее снижение которой делает эксплуатацию машины экономически неэффективной, то есть себестоимость перевозимого груза будет выше доходной ставки (C_d).

Примем исходные данные для расчета эксперимента:

$$\begin{aligned} Q &= 8т; V_m = 21км/ч; K_d = 1,0; K_n = 0,5; \\ C_{пер} &= 3,574 руб./км; C_{ном} = 30 руб./км; \\ \Delta t &= 0,7ч; C_d = 7,18 руб./т \cdot км. \end{aligned}$$

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

Фактическая масса перевозимого груза (грузоподъемность, Q), кг						
8000	7200	6400	5600	4800	4000	3200
Соответствующая грузоподъемности себестоимость $1 т км (C_p)$, руб./т·км						
5,70	6,38	7,18	8,22	9,24	11,00	13,36

Данные расчета-эксперимента показывают, что при массе перевозимого груза менее 6400 кг эксплуатацию транспортного средства делают убыточной. По экономическому критерию цилиндропоршневая группа двигателя ЛЗМ достигла предельного состояния и требует ремонта, то есть устранения возникшего параметрического отказа. На производительность лесозаготовительной машины кроме показателей, определяющих транспортную операцию, значительное влияние оказывает производительность ее технологического оборудования на операциях погрузки (набора пачки деревьев, хлыстов, сортиментов) и разгрузки перемещаемого груза. К основным элементам или узлам гидропривода технологического оборудования ЛЗМ, которые могут иметь параметрический отказ, можно отнести гидроцилиндры, гидромоторы, гидрораспределители, гидронасосы.

Рассмотрим влияние снижения производительности гидроманипулятора трелевочного трактора на экономическую эффективность его работы.

Техническая производительность гидроманипулятора Π , трелевочного трактора, согласно работе [5], определяется по зависимости:

$$\Pi_m = \frac{3600 \cdot Q}{T_p}, \quad (3)$$

где Q – объем пачки деревьев, которую можно погрузить в зажатый коник за рейс, $м^3$; T_p – продолжительность работы гидроманипулятора за период набора пачки, с.

Продолжительность работы гидроманипулятора по набору пачки определяется зависимостью:

$$T_p = t_u \cdot n_u, \quad (4)$$

где t_u – продолжительность одного цикла работы гидроманипулятора по укладке одного дерева в зажимной коник, с; n_u – количество циклов работы манипулятора по набору пачки в зажимной коник.

Продолжительность одного цикла работы гидроманипулятора равна:

$$\begin{aligned} t_u &= K_1(t_{zn} + t_{zl}) + K_2(t_{cn} + t_{co}) + \\ &+ K_3(t_{pn} + t_{po}) + K_4(t_{zp} + t_{zz}), \end{aligned} \quad (5)$$

где K_1, K_2, K_3, K_4 – количество перемещений соответственно поворотной колонне, изменению вылета стрелы, рукояти, захвату за один цикл работы гидроманипулятора; t_{zn}, t_{zl} – время, затрачиваемое на поворот гидроманипулятора вправо и влево, с; t_{cn}, t_{co} – время, затрачиваемое на подъем и опускание стрелы, с; t_{pn}, t_{po} – время, затрачиваемое на подъем и опускание рукояти, с; t_{zp}, t_{zz} – время, затрачиваемое на раскрытие и закрытие захвата, с.

Среднее количество циклов по набору пачки в зажимной коник определяется по формуле:

$$n_u = \frac{Q}{q_o \cdot K_5}, \quad (6)$$

где q_o – средний объем дерева, $м^3$; K_5 – коэффициент одновременного захвата нескольких деревьев захватывающим устройством гидроманипулятора.

Расчетную себестоимость (C_p) одного кубометра древесины, перемещаемой гидроманипулятором, а в последующем трелевочной трактором, определим по формуле:

$$C_p = \frac{1}{\Pi_m} \left(C_{пер} + \frac{C_{ном} \cdot T_p}{3600} \right). \quad (7)$$

Переменные расходы, приходящиеся на 1 час эксплуатации трелевочного трактора, определяются зависимостью:

$$C_{пер} = (C_{CM} + C_{ЗПЧ} + C_{компл}) + C_{от}, \quad (8)$$

где C_{CM} , $C_{ЗПч}$, $C_{компл}$ – затраты, приходящиеся на закупку смазочных материалов, запасных частей и комплектующих, руб./ч; $C_{от}$ – оплата труда оператора за час эксплуатации трактора с отчислениями на социальное страхование, руб./ч.

$$C_{пост} = C_A + C_{пр}, \quad (9)$$

где C_A – амортизационные отчисления, приходящиеся на 1 час эксплуатации трактора, руб./ч; $C_{пр}$ – прочие расходы, приходящиеся на 1 час эксплуатации трактора при работе гидроманипулятора, руб./ч.

Для достижения рентабельной работы гидроманипулятора, а значит, трактора в целом, нельзя допускать, чтобы себестоимость руб./м³ была выше доходной ставки:

$$C_d \geq C_p. \quad (10)$$

Располагая показателями работы гидроманипулятора, можно определить зависимость себестоимости единицы продукции от величины износа его гидроагрегатов через изменение величин параметров их технической характеристики (производительности гидронасоса; усилия, развиваемого гидроцилиндром, и т. п.).

На основе условного примера произведем расчет себестоимости одного кубометра древесины в зависимости от снижения часовой производительности гидроманипулятора. Примем для гусеничного трелевочного трактора типа ТБ-1М следующие условные данные, характеризующие параметры набора гидроманипулятором пачки деревьев за комли:

$$\begin{aligned} Q &= 8 \text{ м}^3; \quad q_0 = 0,4 \text{ м}^3; \quad K_1 = 4; \quad K_2 = 5; \quad K_3 = 5; \\ K_4 &= 3; \quad K_5 = 1; \quad C_{CM} &= 100 \text{ руб./час}; \\ C_{ЗПч} &= 47 \text{ руб./час}; \quad C_{компл} &= 57 \text{ руб./час}; \\ C_A &= 73 \text{ руб./час}; \quad C_{пр} &= 51 \text{ руб./час}; \\ C_d &= 8,5 \text{ руб./м}^3. \end{aligned}$$

Определим продолжительность одного цикла работы гидроманипулятора по формуле (5):

$$\begin{aligned} t_{ц} &= 4(0,95 + 0,84) + 5(1,9 + 2,4) + \\ &+ 5(0,8 + 1,14) + 3(0,82 + 0,8) = 43,22 \text{ с}. \end{aligned}$$

Среднее количество циклов по набору пачки в зажимной коник (при условии $K_5 = 1$) равно:

$$n_{ц} = \frac{8}{0,4} = 20.$$

Продолжительность работы гидроманипулятора за рейс работы трелевочного трактора определим по формуле (4):

$$T_p = 43,2 \cdot 20 = 864 \text{ с}.$$

Определим техническую производительность гидроманипулятора трелевочного трактора по формуле (3):

$$П_m = \frac{3600 \cdot 8}{882} = 33,33 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Зависимость величины условной производительности от увеличения цикла работы гидроманипулятора приведена на рис. 1.

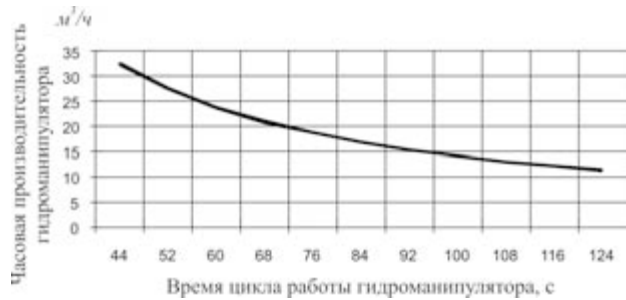


Рис. 1. График зависимости условной производительности гидроманипулятора от изменения (увеличения) времени его цикла работы

Согласно формулам (8) и (9), имеем:

$$\begin{aligned} C_{пер} &= (100 + 47) + 57 = 204 \text{ руб./ч}; \\ C_{пост} &= 73 + 51 = 124 \text{ руб./ч}. \end{aligned}$$

Расчетная себестоимость одного кубометра древесины, перемещаемой гидроманипулятором с технически исправным гидроприводом, равна:

$$C_p = \frac{1}{33,33} \left(204 + \frac{124 \cdot 864}{3600} \right) = 7,03 \text{ руб./м}^3.$$

Зависимость условной себестоимости от снижения производительности гидроманипулятора представлена на рис. 2.

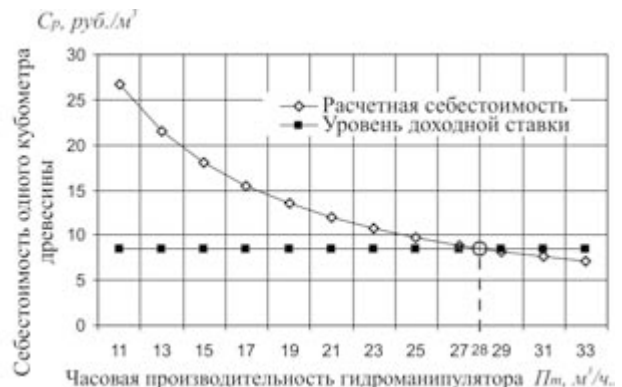


Рис. 2. Зависимость величины расчетной себестоимости одного кубометра стреланной древесины от снижения производительности гидроманипулятора

Приведенный условный пример показывает необходимость установления реальных характе-

ристик параметрических отказов гидроагрегатов гидросистемы привода технологического оборудования лесных машин.

В рассмотренном условном примере производительность гидроманипулятора не должна быть ниже $28 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Организация проверок технического состояния гидрооборудования (гидронасосов, гидроцилиндров и т. п.) приобретает важное значение, когда гидроагрегаты гидросистемы, длительное время находясь в работе, с какого-то момента могут не обеспечивать необходимой производительности как технологического оборудования, так и машины в целом.

Проверка фактического технического состояния объекта, как правило, сопряжена с затратами и с тем, что проверяемая система или какая-то ее часть должны быть выведены из эксплуатации на некоторое время для осуществления процедуры проверки.

Это обстоятельство означает, что более частые проверки приводят к увеличению затрат на их проведение и, самое главное, к уменьшению коэффициентов технической готовности и использования лесозаготовительной машины. С другой стороны, более редкие проверки создают определенную вероятность эксплуатации оборудования и машины за пределами допустимого уровня снижения производительности. Таким образом, имеют место факторы, противоречиво воздействующие на эффективность эксплуатации лесозаготовительной машины. Эти факторы в значительной степени и определяют стратегии и способы проверки технического состояния рассматриваемых объектов.

Рассмотрим стратегию планирования проверок на основе баланса стоимости проверок и потерь от необнаружения неисправности системы. Будем считать, что каждая проверка имеет фиксированную стоимость C_1 , а пребывание системы в неисправном состоянии в течение одного часа обходится в $C_2 \text{ руб./ч}$. Тогда отказ (снижение технических показателей ниже допустимых), возникающий в любой момент между некоторыми k -й и $(k+1)$ -й по счету проверками, вызывает эксплуатационные потери, в среднем равные следующей величине:

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} \{(k+1) \cdot C_1 + C_2 \cdot (t_{k+1} - x)\} dF(x), \quad (11)$$

где $F(x)$ – распределение времени до первого параметрического отказа системы.

Параметрический отказ может возникнуть после любой по счету проверки, поэтому для получения полных ожидаемых потерь ($M[\Pi_0]$) от эксплуатации машины после возникновения параметрического отказа нужно просуммировать выражение (11) по всем возможным k от 0 до ∞ . В связи с этим имеем:

$$M[\Pi_0] = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \{(k+1) \cdot C_1 + C_2 \cdot (t_{k+1} - x)\} dF(x). \quad (12)$$

Организация проверок через постоянный период времени определяет так называемую периодическую стратегию проверок. Проведение проверок с переменным интервалом определяет последовательные стратегии [3].

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 изменяться, то есть периоды времени между очередными проверками должны сокращаться, чтобы не пропустить момент наступления параметрического или аварийного отказа.

На конечном интервале времени длительностью T нужно спланировать число проверок и величины интервалов между ними так, чтобы достигался минимум максимально возможных потерь вида (12) при любом, даже неизвестном, распределении $F(t)$.

При организации проверок через постоянный интервал τ величина полных ожидаемых эксплуатационных потерь приобретает вид:

$$M[\Pi_0] = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{k\tau}^{(k+1)\tau} \{(k+1) \cdot C_1 + C_2 \cdot [(k+1)\tau - x]\} dF(x). \quad (13)$$

При неизвестном законе распределения $F(t)$ могут быть предложены последовательно-периодические стратегии проверок с периодом T , имеющим конечное значение. В этом случае трудно представить эксплуатационные потери, обусловленные неисправностью, возникающей между k -й и $(k+1)$ -й проверками ($k = 0, 1, 2, \dots, n-1$). Если обозначить через ω случайный момент возникновения параметрического отказа системы, то при различных условиях его возникновения во времени потери будут равны:

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

Ввиду того что параметрический отказ системы может возникнуть в любой момент времени в заданном интервале или не возник-

нуть вообще за время $[0, T]$, полные ожидаемые потери $(M[\Pi_s(T)])$ за это время будут равны:

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

При неизвестном распределении момента появления неисправности $F(t)$ планирование проверок можно формулировать на основе минимаксного критерия [4]:

$$\min_{\{t_k\}} \max_{n, F(t)} M[\Pi_s(T)] \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

Значения $M[\Pi_s(T)]$ вычисляются по выражению (15), а максимум берется по всем возможным распределениям $F(t)$.

Минимаксная стратегия проверок сводится к выводу числа проверок n как наибольшего целого числа, удовлетворяющего неравенству:

$$C_1 n^2 + C_1 \cdot n + 2(C_1 - C_2 T) \leq 0. \quad (17)$$

Моменты последовательных проверок t_k определяются, согласно работе [4], по выражению:

$$t_k = k \left[\frac{T}{n+1} + \frac{C_1}{2C_2} \left(\frac{n(n+3)}{n+1} - (k+1) \right) \right]. \quad (18)$$

Диагностику гидроагрегатов гидросистемы привода технологического оборудования ЛЗМ, согласно работе [6], целесообразно проводить передвижными средствами технического сервиса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жожикашвили В. А., Райкин А. Л. Определение целесообразного режима работы резервного блока системы // Структурная теория линейных устройств: Сб. науч. тр. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 77–79.
2. Кутырев Е. В. Обоснование стратегий и параметров объектов технического сервиса лесозаготовительных машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 19 с.
3. Перротте А. И. О режиме оптимальной профилактики систем длительного пользования // Автоматика. 1961. № 3.
4. Райкин А. Л. Элементы теории надежности для проектирования технических систем. М.: Сов. радио, 1967. 265 с.
5. Швед А. И. Трелевочные тракторы. Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2003. 267 с.
6. Шиловский В. Н. Теоретические основы и стратегии организации маркетинга и менеджмента технического сервиса территориально распределенных машин и оборудования. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. 324 с.