УДК 630.383

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕМОНТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

К.А. Яковлев

Лесозаготовительные машины, в своем большинстве, используются на операциях, результаты которых можно оценивать в единицах товарной продукции или ее стоимостном эквиваленте. Это обстоятельство можно рассматривать как решающий аргумент в пользу оптимизации параметров стратегии ремонтного обеспечения этих машин по экономическому критерию. Особенно естественен такой подход в моделях профилактики, где приходится сопоставлять потери продукции из–за простоев машины по техническим причинам со стоимостью преднамеренно недоиспользованного запаса годности ее составных частей при их превентивных заменах (ремонтах).

Издержки, связанные со старением элемента, накоплением в нем усталостных и износных изменений, его ремонтным обеспечением являются функцией значительного числа переменных [1].

Во-первых – это вероятность Q перехода рассматриваемого элемента из работоспособного в неработоспособное состояние к моменту t_t в заданных условиях использования.

$$Q = Q\left[t_V, Y(t), Y_n\right], \qquad (1)$$

где Y(t) – случайная функция, связывающая значение параметра состояния Y с наработкой (временем) t. Предполагается, что вид функции Y(t) априорно известен, также как и ее основные статистические параметры – математическое ожидание m_y и дисперсия σ_y^2; Y_n – значение функции Y, соответствует предельному состоянию элемента, характеризующему его отказ.

Во-вторых, экономические характеристики последствий отказа и процессов его предупреждения C.

$$C = C\left(C_{np}, C_s, C_k\right), \qquad (2)$$

где $C_{пр}$ потери от простоя машин в связи с отказом элемента; C_s – стоимость превентивной замены элемента; C_k – стоимость контроля. На данном этапе исследования стоимость контроля отдельно не учитывается, а включается в состав C_s.

Введем дополнительно характеристику относительной (нормированной) величины издержек при отказе в единицах и долях стоимости превентивной замены элемента.

$$C^0 = \frac{C_s + C_{пр}}{C_s} = 1 + \frac{C_{пр}}{C_S} = 1 + C^0_{пр} . \qquad (3)$$

Управление процессом ремонтного обеспечения машины, т.е. управление ее надежностью в эксплуатации характеризуется включением в этот процесс параметров, ответственных за контроль технического состояния и принятие решений о предупредительной замене (ремонте, регулировке). Издержки, связанные с управлением зависят как от управляющих параметров, так и от характеристик стохастического процесса старения. К ним можно отнести вероятность нахождения машины в работоспособном состоянии в момент контроля и принятия соответствующего решения

$$P = P\lfloor Y(t), Y_{п}, Y_{д}, t_{конт} \rfloor, \qquad (4)$$

где Y_d – упреждающий допуск на предельное значение контролируемой переменной Y при превентивной замене элемента, или в других терминах, допускаемая потеря запаса годности при такой замене $\Delta Г$; $t_{конт}$ – наработка между операциями контроля; K_1, K_2, …K_n – номер контроля.

В дальнейшем мы будем использовать относительные значения управляющих параметров, а именно:

$$Y^0_{д} = Y_{д} / Y_n ;\ m = T / t_{конт},\ Г^0_{д} = Г_{д} / Г , \qquad (2.6)$$

где m – срок службы элемента в единицах межконтрольной наработки;

$Г^0_{д}$ – относительные допускаемое использование запаса годности элемента;

$Г_д$ – запас годности элемента в момент контроля;

$Г$ – возможный запас годности элемента на начало эксплуатации, $Г\ =1$

Схема, иллюстрирующая взаимное расположение переменных, характеризующих состояние элемента приведена на рисунке 1.

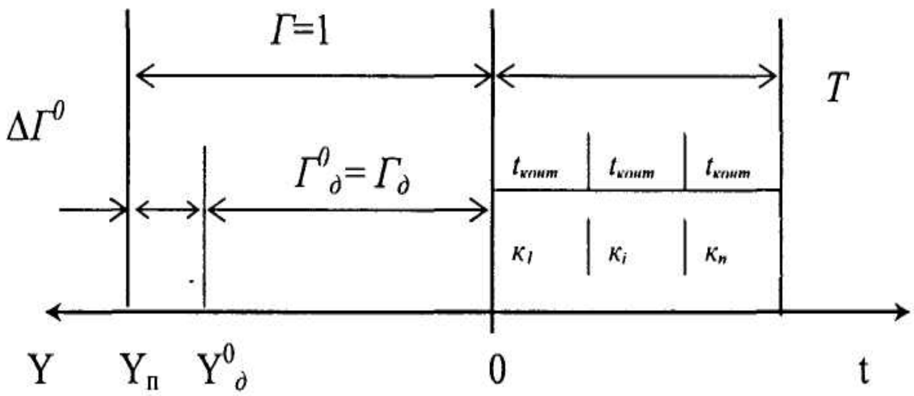


Рисунок 1 – Схема расположения нормированных управляющих параметров

К характеристикам стохастического процесса старения, влияющих на величину издержек, связанных с управлением, можно отнести и экономические характеристики, связанные с превентивно осуществляемой заменой [1].

Вычисление функции (4) сводится в теоретическом плане к решению задач о среднем числе выбросов $n_а$ и $n_р$ случайной функции Y(t) за уровни $Y_п$ и $Y_д$ для промежутка времени $t_{конт}$, являющегося периодически повторяющейся частью общего времени T использования элемента [1]. В общем виде это решение можно записать следующим образом:

$$\bar{v}_a = \int_0^{t_{котн}} \int_0^{\infty} v f(Y_n, V/t) dV dt,$$

$$\bar{v}_a = \int_0^{t_{ккон}} \int_0^{\infty} v f(Y_д, V/t) dV dt, \qquad (6)$$

где V(t) – скорость изменения ординаты случайной функции Y(t) , $f(Y_д V/t)$ – двухмерный закон распределения ординаты случайной функции $Y=Y_д$ и ее производной в момент t.

Для нормальных стационарных процессов и в случае их независимости от взаимного влияния Y_n и $Y_д$ уравнение (6) решалось бы достаточно просто. Тогда для стационарного процесса можно записать

$$\bar{v}_a = \int_0^\infty Vf(Y_{n,} V)dV,$$

$$\bar{v}_p = \int_0^\infty Vf(Y_{д,} V)dV. \tag{7}$$

Для нормального процесса двухмерная плотность распределения вероятности f(Y,V) распадается на произведение нормальных плотностей распределения, поэтому для $Y_n V$ можно написать

$$f(Y,V) = \frac{1}{\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(y-\bar{y})^2}{2\sigma_r^2}} \frac{1}{\sigma_v\sqrt{2\pi}} e^{\frac{v^2}{2\sigma_v^2}}, \tag{8}$$

где дисперсия скорости изменения ординаты случайной величины функции σ_r^2 равна значению корреляционной функции скорости в нуле, а математическое ожидание $\overline{V}(t)$ вследствие стационарности случайного процесса равно нулю.

Подставляя (8) в (7) получим для среднего числа выбросов в единицу времени n_a и n_p:

т.е.
$$\bar{n}_a = P(Y_n) = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_Y} e \frac{-(Y_n - \overline{Y})^2}{2\sigma_Y^2},$$

$$\bar{n}_p = P(Y_д) = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_Y} e \frac{-(Y_д - \overline{Y})^2}{2\sigma_Y^2}. \tag{9}$$

Однако в нашем случае вероятности $P(Y_n)$ и $P(Y_д)$ зависимы друг от друга, а случайный процесс изменения параметра состояния не всегда подчинен нормальному закону. Кроме того, наличие дополнительного переменного параметра – периодичности контроля, значения которого влияют на вероятность нахождения элемента в исправном или в неисправном состоянии и оптимизация которого входит в круг решаемой задачи, делает аналитическое решение чрезвычайно сложным и едва ли выполнимым делом. К этому добавляются трудности с вычислением n_a и n_p как аналогов временной плотности выбросов случайной функции Y за уровни $Y_д$ и Y_n во всем периоде T_c использованием функции восстановления [2].

Все это серьезно усложняет математическую модель и расчеты. Поэтому будем подсчитывать издержки за весь период Т в предположении, что замены осуществляются только на новые элементы. Для детали машины это допущение естественно, для машины как элемента в дальнейшем будет снято.

Общее число превентивных замен элементов, не отказавших за период *Т,* можно выразить интегральным уравнением Вольтерра второго рода, именуемым в теории надежности функцией восстановления [1]

$$H_1(T) = F_1(T) + \int_0^{t=T} H_1(t-\tau) f_1(t) d\tau, \tag{10}$$

где $H_1(T)$ – среднее число превентивных замен за время T; $F_1(T)$ – функция распределения времени до превентивной замены; $f_1(t) = \frac{dF_1}{dt}$; τ – переменная интегрирования.

Соответственно затраты, связанные с превентивными заменами за период Т, запишутся тогда так

$$W_1 = H1(T) C_s. \tag{11}$$

Аналогично, общее число замен элементов, отказавших за период Т, будет равно:

$$H_2(T) = Q(T) + \int_0^{t=T} H_2(t-\tau) f_2(t) d(\tau), \tag{12}$$

где $f_2(t) = \frac{dQ}{dt}$, а затраты, связанные с их заменой

$$W_2 = H_2(T)(C_s + C_{np}). \tag{13}$$

Складывая W_1 и W_2 и, переходя к нормированным и удельным значениям, получим, суммарные удельные издержки за период Т в виде:

$$W_{уд}^{0}=\frac{H_1(T)+H_2(T)(1+C_{пр}^{0})}{T}. \quad (14)$$

Сочетание управляющих параметров Y_n^o и m^*, при котором величина $W_{уд}^{o}$ достигает минимума, будем называть оптимальными параметрами управления техническим состоянием элемента в соответствии со стратегией технического обслуживания м ремонта машин «по состоянию», при задаваемых значениях $C_{пр}^{o}$ и известных характеристиках естественного (неуправляемого) процесса изменения его состояния. Аналитическое решение поставленной задачи, учитывая входящие в ее описание случайные функции и интегральные уравнения, как было уже сказано, едва ли возможно, а на фоне широко распространенной вычислительной техники и нецелесообразно. Продуктивнее использовать численные методы [3].

Мы остановились на наиболее естественном для решения таких задач методе статистических испытаний (методе Монте–Карло), позволяющем воспроизводить на имитационной модели случайный процесс появления отказов элементов машины по мере роста наработки, и прослеживать последствия их упреждения за счет превентивных замен. Разработанная с нашим участием компьютерная программа «Богерник» реализует случайный процесс $Y=f(t)$, схематически изображенный на рисунке 2.

Случайная функция состояния $Y(t)$ задается ее математическим ожиданием $\overline{Y}=V_c t^a$ и плотностью распределения интенсивности (квазискорости) изменения параметра состояния (интенсивности потери годности элемента машины) $\varphi(V_c)$.

Параметрами этой функции являются:

– среднее значение интенсивности изменения функции состояния $V_c=1$;

– коэффициент вариации интенсивности изменения функции состояния $V_{V_c}=\frac{V_c^{\sigma}}{V_c}$, значения которого изменяются в интервале 0,2...0,4 через 0,1;

Параметр, a=1 ...2 , шаг изменения которого равен 0,1; наработкой до j-го контроля в i-ой реализации $t_{контji}$.

Рассмотрим:

– событие Ai с параметрами $Y_i \geq Y_n$, $Y_i < Y_д$, при $t_{контji}$, $j = 1,...m$;

– событие B_j: $Y_i < Y_n$ и $Y_i \geq Y_д$ при $t = t_{контij}$, $j = 1,...m$.

Наработка до события A или B в i-ой реализации обозначим как t_{ABi}.

Задача состоит в отыскании оптимального значения состояния элемента $Y_д^*$ при котором затраты связанные с превентивными заменами отказавших элементов на единицу рабочего времени будут минимальными, т.е.

$$Y_д^\bullet \text{при} \sum_{\substack{i=1\\i=1}}^{n,m} \frac{W}{T} \to \min,$$

где n - число реализаций; m – число межконтрольных периодов.

При моделировании $Y_П = 1, T = 1, a, V_c$ параметры: задаются в определённом интервале. Аргументы $C°_p$ и m варьируются.

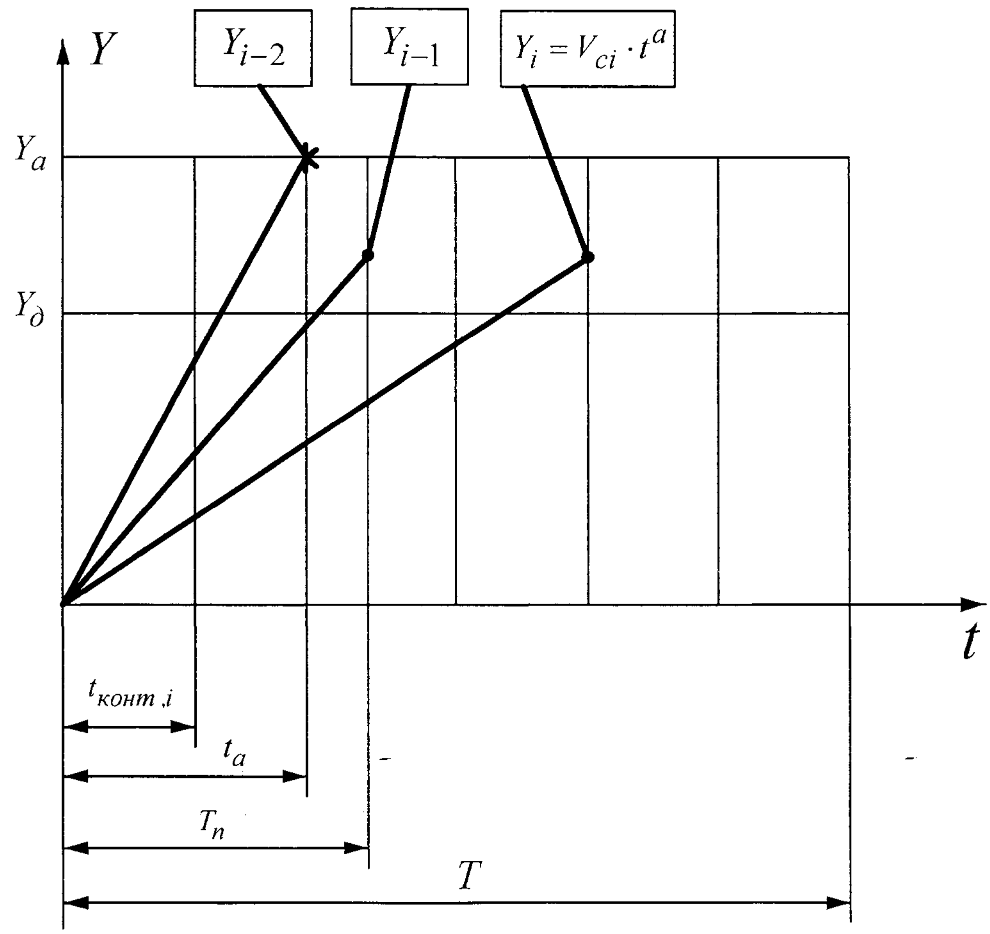
Определяются:

– число аварийно замененных элементов $\frac{n_a}{T}$;

– число профилактически замененных элементов $\frac{n_p}{T}$ в расчете на единицу наработки функции в функции $Y_д$ и $t_{клнт}$;

– суммарные удельные издержки $W^o_{уд} = \frac{\sum W}{T}$ на единицу наработки в функции $C^o_{пр}$ и m;

– нормированное оптимальное значение состояние элемента $Y_д^{o\bullet} = \frac{Y_д^\bullet}{Y_n} = f\left(C^o_{пр}, m\right)$.



* – отказ; • – превентивная замена (ремонт) в момент планового контроля

Рисунок 2 – Схема событий в случайном процессе изменений технического состояния элемента: если A, то $W = C_S + C^o_{пр}$; если B, то $W = C_S$; если $t_{A,B} \le T$, то $Y_i = V_{ci} t^a$.

Укрупненная блок-схема алгоритма такой модели приведена на рисунке 3. Операторы 1 – 2 осуществляют ввод исходной информации в память и генерирование программным способом случайных чисел ξ_i, равномерно распределенных в интервале (0, 1).

Оператор 3 использует числа ξ_i для получения случайных значений интенсивности изменения контролируемого параметра V_{cij} в i-ой реализации для j-го межконтрольного периода при принятом значении дисперсии σ^2 или коэффициенте вариации v [4].

Операторы 4 и 5 воспроизводят численно случайное изменение параметра состояния Y_{ij} за период t_{ij} исходя из соотношения $Y_{ij} = \sum^{i} V_{cj} t^{a}$.

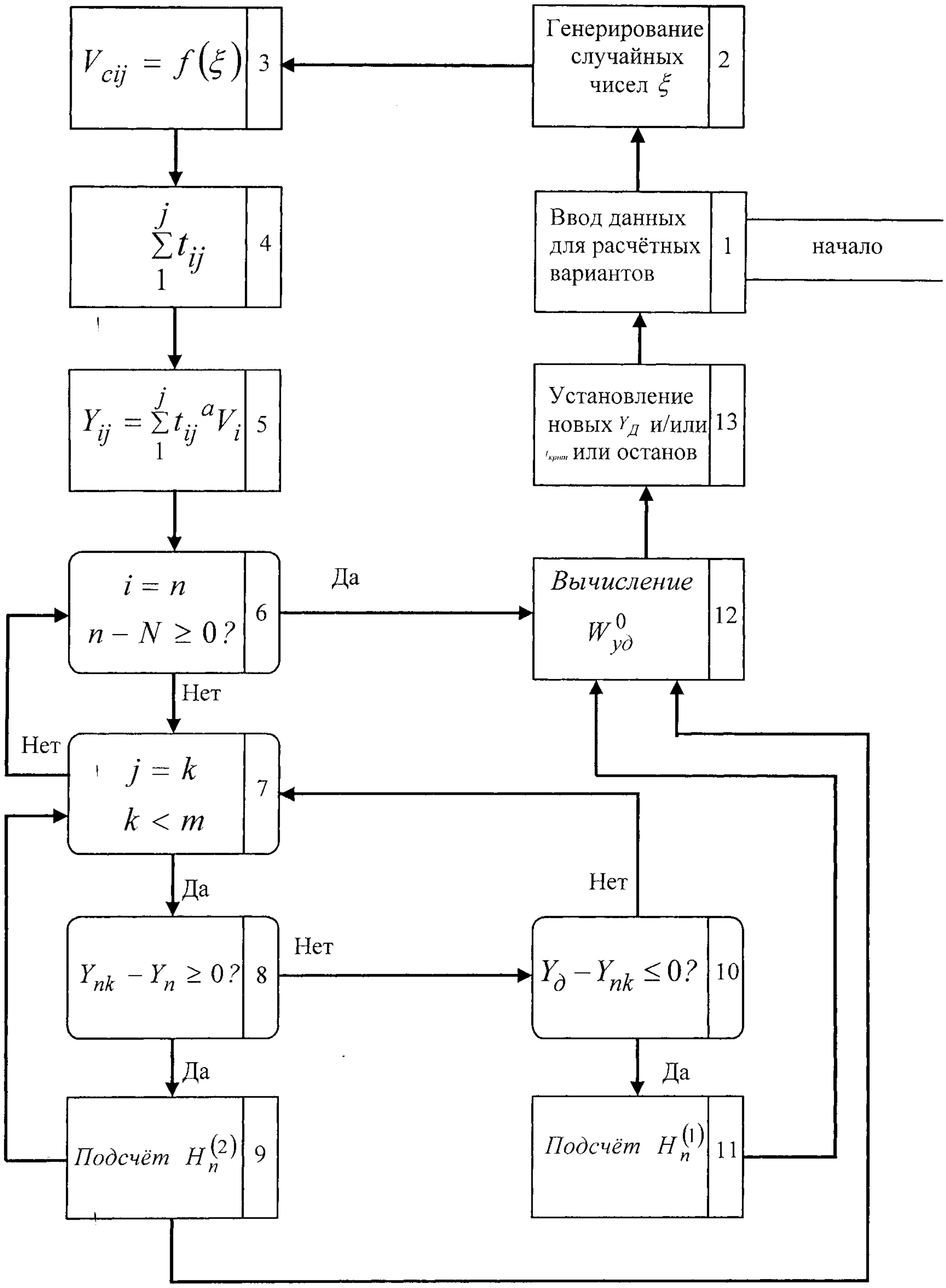


Рисунок 3 – Укрупненная блок-схема алгоритма численного моделирования и анализа результатов управления ремонтным обеспечением элемента машины в рамках стратегии C_{III}^{2}

Оператор 6 присваивает реализации i очередной номер n и проверяет, не превосходит ли п общего числа необходимых реализаций п, т.е. $n - N > 0$. Если «да» – управление передается операторам 12 и 13.

Если «нет» – оператор 7 присваивает межконтрольному периоду j-му очередной номер «к» и проверяет, не превосходит ли он общего числа межконтрольных периодов, т.е. проверяет выполнение неравенства: $k<m$

Если «нет», т.е. больше или равно, осуществляется возврат к оператору 6 для осуществления реализации $i = n + 1$. Если «да», – переход к оператору 8.

Оператор 8 решает вопрос о достижении параметром Y_{ij} в i-ой реализации j-го межконтрольного периода значения Y_n, т.е. определяет произошел ли отказ элемента. Если «да»– управление переходит к оператору 9, если «нет» – к оператору 10.

Оператор 9 осуществляет подсчет числа восстановлений после отказа в к-ом периоде – $\Delta Hi_j^{(2)}$ и общее значение функции восстановления для конца этого периода: $H_i^{(2)} = \sum_{j=1}^{k} \Delta H_{ij}^{(2)}$. Затем через оператор 7 продолжится n-ая реализация в межконтрольном периоде $j = k + 1$.

Оператор 10 включается в том случае, если в данном конкретном межконтрольном периоде отказ не зафиксирован и осуществляет проверку неравенства $Y_д - Y_{пк} \le 0$.

Если оно выполнено, т.е. в данном периоде параметр Y_{ij} попал в зону упреждающего допуска, то осуществляется превентивная замена элемента с соответствующими затратами и управление передаётся оператору 11.

Если «нет», т.е. если $Y_д - Y_{nk} > 0$ и предупредительной замене здесь нет места, то оператор 7 продолжает данную n-ую реализацию в следующем межконтрольном периоде $j = k + 1$.

Оператор 11 подсчитывает число восстановлений, связанных с превентивными заменами в k-ом периоде, т.е. $\Delta H_i^{(1)}$ и общее число таких событий за периоды j =1,2,3... k, равное

$$H_i^{(1)} = \sum_{j=1}^{k} \Delta H_{ij}^{(1)} .$$

Оператор 12 осуществляет расчет издержек $W_{1,i}$, $W_{2,i}$ $W°_{yd}$, по формулам (11), (13), (14) для данной n-ой реализации. После того как оператор 6 подтвердит выполнение неравенства $n - N \geq 0$, наращивание числа реализаций прекращается и подсчитывается среднее значение издержек за период T по N реализациям

$$W_{уд}^{0} = \frac{H_1(T) + H_2(T)(1 + C_{пр}^{0})}{NT} .$$

Проведенный анализ указывает на необходимость существенной корректировки технической документации на техническое обслуживание и ремонт лесозаготовительной техники в части допустимых при ремонте размеров и, вообще, любых параметров состояния, нормативные значения которых были оптимизированы в экономических условиях, существенным образом отличающихся от нынешних.

Список литературы

1. Прохоров, В. Б. Эксплуатация машин в лесозаготовительной промышленности / В. Б. Прохоров. – М. : Лесная промышленность, 1978. – 304 с.

2. Пасечников, Н. С. Основы технико–экономического обоснования периодичности технических уходов за машиной / Н. С. Пасечников // Актуальные вопросы эксплуатации машино-тракторного парка в сельском хозяйстве. – М.: ОНТИГОСНИТИ, 1969. – С. 223–238.

3. Михлин, В. М. Прогнозирование технического состояния машин / В. М. Михлин. – М. : Колос, 1976. – 287 с.

4. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.