

УДК 631.312.4.2

## МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ НОРМ НАДЕЖНОСТИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

*Бойко Л.И., Бойко Т.В. (БГАТУ), Гоман А.М., Баран О.А. (ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»)*

*Методология определения рациональных норм надежности зерноуборочного комбайна основана на рассчитываемой стоимости зерноуборочного комбайна в функции наработки между отказами. В работе задается зависимость чисел ожидаемых отказов за гарантийный период и полный ресурс от наработки между отказами. Предлагаются расчетные соотношения стоимости комбайна на приобретение, восстановление работоспособности за гарантийный период и полный ресурс, стоимости затрат, обусловленных простоями в ремонте в период уборки урожая. На основании рассмотренных подходов определяются рациональные нормы надежности зерноуборочного комбайна.*

### **Введение**

В настоящей работе рациональные нормы надежности сельскохозяйственной техники определяются на основании научно-обоснованного подхода из условия оптимизации коэффициента эффективности ее использования. Стоимость жизненного цикла включает суммарную стоимость затрат на разработку, организацию производства, изготовление, транспортировку, эксплуатацию, хранение, техническое обслуживание и ремонт, а также утилизацию изделия после исчерпания ресурса работоспособности. В стоимость жизненного цикла также могут быть включены и расходы на подготовку технического персонала. Использование изложенной общей методологии определения рациональных норм надежности в виде конкретного алгоритма расчета связано с неоднозначностью определения эмпирических коэффициентов, используемых при расчете ожидаемого числа отказов по степенной модели AMSAA/Кроу [1-3].

Недостаточная надежность сельскохозяйственной техники приводит к необоснованно высоким затратам на восстановление ее работоспособности, потерям сельскохозяйственной продукции по причине простоя машин в ремонте в оптимальные сроки проведения агротехнических работ, а также снижению ее потребительской оценки и конкурентоспособности. С другой точки зрения, всякое повышение надежности выпускаемой техники связано, как правило, с неизбежным повышением ее цены. Определение рациональных норм надежности сельскохозяйственной техники позволяет обеспечить оптимальный для потребителя компромисс между надежностью сельскохозяйственной техники и стоимостью ее приобретения и эксплуатации.

### **Методология определения рациональных норм надежности.**

1 Определение стоимости комбайна в зависимости от наработки между отказами. Рассчитывается стоимость зерноуборочного комбайна  $C_{W_i}$  в зависимости от наработки между отказами  $W_i$  с фиксированным шагом  $\Delta W$  по формуле [4]:

$$C_{W_i} = C_0 e^f, \quad (1)$$

где  $C_0$  - первоначальная стоимость комбайна; величина  $f$  определяется зависимостью

$$f = \frac{W_i - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}}, \quad (2)$$

$W_{\min}$  - первоначальная наработка между отказами;  $W_{\max}$  - максимальная наработка между отказами;

$$W_i = W_{\min} + i \Delta W; \quad (3)$$

$i$  - текущее значение (целое число) варианта изменения конструкции.

В соответствии с рекомендациями [5] максимальная и минимальная наработки связаны соотношением

$$W_{\max} = 3,5 W_{\min}. \quad (4)$$

2 Расчет числа ожидаемых отказов. По заданному текущему значению наработки между отказами  $W_i$  и величине гарантийного срока  $T_W$  из трансцендентного уравнения вычисляется показатель роста надежности  $\alpha_i$  [4] по сравнению с начальным вариантом с наработкой  $W_{\min}$

$$W_i = \left( \frac{W_{\min}}{1 - \alpha_i} \right) \left( \frac{T_W}{W_{\min}} \right)^{\alpha_i}. \quad (5)$$

Параметр формы  $\beta_i$  находится из выражения

$$\beta_i = 1 - \alpha_i. \quad (6)$$

Параметр масштаба  $\lambda_i$  связан с вероятностью безотказной работы  $R_i$ , принимаемой для средней наработки между отказами  $W_i$  согласно Техническим условиям, соотношением

$$\lambda_i = - \frac{\ln R_i}{W_i^{\beta_i}}. \quad (7)$$

Для возможного числа отказов  $n=1,2,\dots$  и значения  $T=T_W$  (накопленное время соответствует гарантийному сроку обслуживания), вычисляется вероятность наступления каждого числа отказов за гарантийный период

$$P[N(T) = n] = \frac{(\lambda T^{\beta})^n e^{-\lambda T^{\beta}}}{n!}. \quad (8)$$

При этом значение  $P[N(T) = 0]$  соответствует вероятности безотказной работы комбайна  $R_i$ .

Учитывая реальные условия эксплуатации, задается величина уровня вероятности проявления максимального числа отказов, т.е. эта величина ограничивается минимальным значением (0,5 – 5%). На основании выполненных расчетов определяется ожидаемое число отказов в гарантийный период  $N_{W_i}^G$  с вероятностью их наступления до заданного уровня, соответствующее задаваемой наработке между отказами  $W_i$ .

Далее рассчитывается число ожидаемых отказов за срок службы зерноуборочного комбайна. Расчет проводится по формулам (1)-(8), принимая в (8) значение  $T=T_h$ , равной полному ресурсу комбайна.

3 Расчет экономической целесообразности увеличения средней наработки между отказами в гарантийный период. Экономическая целесообразность с точки зрения производителя обеспечивается выполнением неравенства

$$C_{\Phi i} \geq C_{Fli}, \quad (9)$$

где  $C_{\Phi i}$ ,  $C_{Fli}$  - фактическая и расчетная стоимости восстановления работоспособности комбайна соответственно.

Расчетная стоимость восстановления работоспособности определяется выражением

$$C_{Fli} = \frac{C_{W_i} - C_0}{\sum_{n_0=1}^{n_0=N_{W_{\min}}^G} n_0 P_{n_0} - \frac{C_{W_i}}{C_0} \sum_{n_i=1}^{n_i=N_{W_i}^G} n_i P_{n_i}}, \quad (10)$$

где  $n_0$ ,  $n_i$  - числа ожидаемых отказов в гарантийный период, соответствующие первоначальной наработке между отказами  $W_{\min}$  и задаваемой наработке между отказами  $W_i$  соответственно;  $N_{W_{\min}}^G$ ,  $N_{W_i}^G$  - максимальные числа ожидаемых отказов в гарантийный период

с вероятностями наступления отказов до заданного уровня, соответствующими первоначальной наработке между отказами  $W_{\min}$  и задаваемой наработке между отказами  $W_i$ ;  $P_{n_0}$ ,  $P_{n_i}$  - вероятности наступления числа  $n_0$  и  $n_i$  отказов.

Фактическая стоимость  $C_{\Phi i}$  устранения одного отказа находится по формуле

$$C_{\Phi i} = C_{\Phi 1D} K_D \frac{C_{W_i}}{C_D}, \quad (11)$$

где  $C_{\Phi 1D}$  - средняя стоимость устранения одного отказа для другого комбайна,  $C_D$  - стоимость приобретения комбайна с известной стоимостью устранения одного отказа;  $K_D$  - коэффициент удорожания средней стоимости одного отказа для комбайна другой конструкции.

При аналогичной конструкции комбайнов  $K_D = 1$ . Для комбайнов более сложной конструкции величина  $K_D$  определяется методом экспертных оценок.

При выполнении соотношения (9) необходимо повышать надежность комбайна, увеличивая наработку между отказами на величину  $\Delta W$  и проверить неравенство (9) для следующего варианта изменения конструкции в сторону увеличения наработки. Если неравенство (9) не выполняется, то увеличение наработки с точки зрения производителя не является экономически обоснованным.

4 Расчет экономической целесообразности увеличения средней наработки между отказами за ресурс. Рассчитывается экономическая целесообразность увеличения средней наработки между отказами с точки зрения потребителя с учетом стоимости восстановления комбайна за срок службы и затрат, обусловленных простоями комбайна в ремонте в период уборки урожая.

Экономическая целесообразность обеспечивается выполнением неравенства

$$C_{\Phi i} \geq \mathcal{E}_{F i}, \quad (12)$$

где  $\mathcal{E}_{F i}$  - расчетная стоимость восстановления работоспособности комбайна с учетом затрат во время простоя в ремонте за полный ресурс.

Расчетная стоимость восстановления работоспособности определяется выражением

$$\mathcal{E}_{F i} = \frac{(C_{W_i} + \Pi_{W_i} + C_A^{W_i}) - (C_0 + \Pi_{W_{\min}} + C_A^{W_{\min}})}{\sum_{n_0=1}^{N_{W_{\min}}^L} n_0 P_{n_0} - \frac{C_{W_i}}{C_0} \sum_{n_i=1}^{N_{W_i}^L} n_i P_{n_i}}, \quad (13)$$

где  $\Pi_{W_i}$  и  $\Pi_{W_{\min}}$  - суммарные потери от осыпания зерна по причине простоев комбайна в ремонтах за срок службы для наработок между отказами  $W_i$  и  $W_{\min}$  соответственно;  $C_A^{W_i}$  и  $C_A^{W_{\min}}$  - дополнительные затраты, вызванные нереализованной стоимостью амортизационных отчислений за срок службы для наработок между отказами  $W_i$  и  $W_{\min}$  соответственно;

$\sum_{n_0=1}^{N_{W_{\min}}^L} n_0 P_{n_0}$  и  $\sum_{n_i=1}^{N_{W_i}^L} n_i P_{n_i}$  - средние числа отказов за срок службы комбайнов, соответствующие наработкам  $W_{\min}$  и  $W_i$ ;  $P_{n_i}$  и  $n_i$  - вероятности и числа ожидаемых отказов за срок службы, соответствующие задаваемой наработке между отказами  $W_i$ ;  $N_{W_i}^L$  - максимальное число ожидаемых отказов за срок службы с вероятностью наступления отказов до заданного уровня, соответствующее задаваемой наработке между отказами  $W_i$ ;  $P_{n_0}$  и  $n_0$  - вероятности и числа ожидаемых отказов за срок службы, соответствующие

**Секция 1: Сельскохозяйственные машины и тракторы:  
расчет, проектирование и производство**

задаваемой наработке между отказами  $W_{\min}^L$ ;  $N_{W_{\min}}^L$  - максимальное число ожидаемых отказов за срок службы с вероятностью наступления отказов до заданного уровня, соответствующее задаваемой наработке между отказами  $W_{\min}$ .

Вычисляются суммарные потери от осыпания зерна  $\Pi_{W_i}$  и  $\Pi_{W_{\min}}$  по формулам

$$\Pi_{W_i} = \Pi_1 N_{W_i}^L, \quad (14)$$

$$\Pi_{W_{\min}} = \Pi_1 N_{W_{\min}}^L; \quad (15)$$

где  $\Pi_1$  - удельные потери от осыпания зерна в одном ремонте

$$\Pi_1 = k_z c q t_c T_{1F}, \quad (16)$$

$k_z$  - коэффициент потерь от осыпания зерна в сутки;  $c$  - стоимость единицы сельскохозяйственной продукции, у.е./т;  $q$  - часовая производительность комбайна, т/час;  $t_c$  - средняя загрузка комбайна в сутки, час;  $T_{1F}$  - время простоя комбайна, необходимое для устранения одного отказа в сутках.

Рассчитываются затраты от нереализованной стоимости амортизационных отчислений

для наработки  $W_i$

$$C_A^{W_i} = \frac{C_{W_i} K_A (N_{W_i}^L)^2 t_{1F}^2}{T_h (T_h - t_{1F} N_{W_i}^L)}, \quad (17)$$

где  $K_A$  - коэффициент перевода цены реализации в амортизируемую стоимость комбайна (как правило, принимается  $K_A=1,15$ );  $t_{1F}$  - время простоя комбайна, необходимое для устранения одного отказа в часах, а для наработки  $W_{\min}$

$$C_A^{W_{\min}} = \frac{C_0 K_A (N_{W_{\min}}^L)^2 t_{1F}^2}{T_h (T_h - t_{1F} N_{W_{\min}}^L)}. \quad (18)$$

Фактическая стоимость  $C_{\phi li}$  устранения одного отказа определяется по формуле (11).

При выполнении соотношения (12) целесообразно повышать надежность комбайна, увеличивая наработку между отказами до  $W_i$ . Если неравенство (12) не выполняется, то увеличение наработки с точки зрения потребителя не является экономически обоснованным.

5 Расчет стоимости комбайна с учетом восстановления работоспособности и потери от простоев в ремонте. После определения экономической целесообразности перехода к новому варианту конструкции с повышенной наработкой между отказами рассчитывается полная стоимость комбайна с точки зрения производителя ( $C_G$ ) и потребителя ( $C_\Sigma$ ).

Полная стоимость комбайна  $C_G$  с точки зрения производителя находится с учетом затрат на восстановление работоспособности в гарантийный период

$$C_G = C_{W_i} + C_{NG}, \quad (19)$$

где  $C_{NG}$  - стоимость восстановления работоспособности комбайнов за время гарантийного обслуживания  $T_w$ .

Величина  $C_{NG}$  вычисляется по формуле

$$C_{NG} = C_{\phi li} \cdot \sum_{n=1}^{n=N_{W_i}^G} n_i P_{ni}. \quad (20)$$

Удельные затраты на гарантийное обслуживание  $C_{relG}$  в процентах от стоимости

комбайна находятся

$$C_{rel/G} = \frac{C_{NG}}{C_G} \cdot 100 \% . \quad (21)$$

Суммарная стоимость комбайна  $C_{\Sigma}$  с точки зрения потребителя определяется затратами на приобретение комбайна, потерями зерна и повышением амортизационных отчислений за срок службы

$$C_{\Sigma} = C_S + C_A^W, \quad (22)$$

где  $C_S$  - стоимость затрат на приобретение комбайна с учетом затрат на потери зерна по причине простоев комбайна в ремонтах за срок службы.

Стоимость  $C_S$  вычисляется из выражения с учетом (14)

$$C_S = C_L + P_{W_i}, \quad (23)$$

где  $C_L$  - полная стоимость комбайна с учетом оплаты восстановления работоспособности за срок службы.

Стоимость  $C_L$  определяется по формуле:

$$C_L = C_{W_i} + C_{NL}, \quad (24)$$

где  $C_{NL}$  - стоимость восстановления работоспособности комбайнов за срок службы  $T_h$ .

Стоимость  $C_{NL}$  вычисляется по формуле:

$$C_{NL} = C_{\phi li} \cdot \sum_{n=1}^{n=N_{\phi i}^L} n_i P_{ni} . \quad (25)$$

Удельные затраты на ремонт  $C_{relL}$  в процентах от стоимости комбайна находятся

$$C_{relL} = \frac{C_{NL}}{C_L} \cdot 100 \% . \quad (26)$$

Указанный анализ соответствует обобщенному подходу к оценке стоимости комбайна в период эксплуатации с постоянной или близкой к ней интенсивностью отказов и не учитывает ее повышения в период интенсивного развития износо-усталостных повреждений. Кроме того, выполненные исследования касаются только экономической оценки и не учитывают социологические и экологические факторы, также влияющие на установление рациональных норм надежности.

Методология апробирована при расчете рациональных норм надежности отечественного зерноуборочного комбайна производительностью 10 т/ч [4]. Выполненные расчеты определения стоимости комбайна показывают, что при увеличении наработки между отказами до величины, равной наработке в двухгодичный гарантийный период, стоимость белорусского комбайна возрастает с 132589 до 251453 долларов США, т.е. стоимость комбайна становится сопоставимой со стоимостью зарубежного комбайна такой же производительности MEGA218 фирмы CLAAS (ФРГ), которая составляет 269180 долларов США. Таким образом, при обеспечении безотказной работы комбайна в течение двухгодичного гарантийного срока эксплуатации стоимость приобретения комбайна становится сопоставимой со стоимостью лучших зарубежных моделей аналогичной производительности. Анализ произведенных по разработанной методологии расчетов свидетельствует, что суммарные затраты, связанные с приобретением комбайна, восстановлением его работоспособности на протяжении расчетного срока службы, а также материальными потерями от простоя комбайна в ремонте в период уборки урожая при существующих ценах приобретения комбайна и восстановления его работоспособности, при наработке между отказами 100 часов остаются минимальными. Дальнейшее повышение наработки между отказами и связанное с ним увеличение цены приобретения комбайна и восстановления его работоспособности не обеспечивает повышение экономической

эффективности его использования. Проведенные исследования показывают, что при наработке между отказами  $W_{min} = 100$  моточасов, цена комбайна с учетом стоимости восстановления работоспособности в течение всего срока службы остается минимальной и повышение надежности до 120 моточасов представляется экономически целесообразным при стоимости отказа, превышающей 1749 долларов США.

### **Заключение**

В работе предложена методология расчета рациональных норм надежности зерноуборочного комбайна из условий экономической целесообразности их повышения с точек зрения производителя и потребителя продукции. С этой целью приведены расчетные зависимости вероятного числа отказов за время гарантийного периода эксплуатации и за полное время использования комбайна, а также зависимости оценок суммарных затрат на приобретение, восстановление работоспособности комбайна и связанные с его простоем потери.

Разработанная методология расчета рациональных норм надежности может быть использована при оценке рациональных норм надежности сельскохозяйственных машин различного назначения.

### **Литература**

1. AMSAA Reliability Growth guide / AMSAA Technical Report No. TR – 652:2000, 2000. - 160 p.
2. V.S. Taneja, F.M. Safie. An Overview of Reliability Growth Models and Their Potential Use for NASA Application / NASA Technical Paper 3309. 1992. – 23 p.
3. Reliability Growth Management: MIL-HDBK-189, 1981. – 149 p.
4. Солитерман Ю.Л. и др. Разработка методологии рациональных норм надежности зерноуборочных комбайнов / Ю.Л. Солитерман, А.М. Гоман, А.А. Дюжев, О.А. Баран // Механика-2007: сб.науч.тр. III Белорусского конгресса по теорет. и прикл. механике ОИМ НАН Беларуси, Минск, 16-18 окт. 2007 г./ ОИМ НАН Беларуси; под общ. ред. акад. М.С. Высоцкого. – Минск, 2007. – С.177-183.
5. D. Mortin, S. Yuhas. Reliability Growth Applications and Advancement // [Electronic resource]. – 2001. – Mode of access: <http://ndia.org/pdfs> 22, 2001. - 41 p.

УДК 629.113-587

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА ВЕДУЩИХ КОЛЕС НЕУПРАВЛЯЕМЫХ МОСТОВ ВНЕДОРОЖНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ**

**Высоцкий М.С., Амельченко П.А., Дубовик Д.А. (ГНУ «Объединенный институт  
машиностроения НАН Беларуси»)**

*Приводятся результаты исследований влияния разработанного дифференциала свободного хода с улучшенной характеристикой блокирующих свойств на тягово-скоростные свойства и управляемость многоприводной колесной машины.*

### **Введение**

В приводе ведущих колес сельскохозяйственных, как правило многоприводных колесных, машин для повышения проходимости и тягово-скоростных свойств широко используются самоблокирующие дифференциалы, среди которых наибольшее распространение получили дифференциалы повышенного трения и дифференциалы свободного хода [1]. Работа последних заключается в осуществлении заблокированного привода ведущих колес при прямолинейном движении и отключении внешнего по отношению к центру поворота (забегающего) колеса в момент изменения знака касательной