

Кухтов В.Г.,  
Лисенко С.В.,

Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені П.Василенка,  
м. Харків, Україна,  
E-mail: sevoli@ukr.net

ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ  
ГРАНИЧНИХ ТА ДОПУСТИМИХ  
ПАРАМЕТРІВ ДЕТАЛЕЙ ВАРІАТОРІВ  
КОМБАЙНІВ

УДК 631.354.2-585.17

*В статті приведено теоретичне обґрунтування вивчення технічного стану деталей варіаторів, критерії при визначенні оптимальних допустимих відхилень параметрів (допустимих спрацювань), розроблено методичні основи визначення граничних і допустимих розмірів деталей клинопасових варіаторів при ремонті та прогнозуванні їх технічного стану за умови забезпечення заданої безвідмовності.*

**Ключові слова:** технічний стан, варіатор, допустима величина параметра, граничне відхилення, ресурс, спряження, надійність.

**Актуальність проблеми.** Під оптимальним параметром розуміється граничне його значення, що забезпечує максимальну ефективність експлуатації та ремонту за обраним критерієм. Допустиме значення параметра є важливий показник, який впливає на ймовірність безвідмовної роботи, довговічність, витрати запасних частин, вартість ремонту комбайнів та інших машин масового виробництва.

Якщо граничне значення параметра (граничний знос), що обумовлює втрату працездатності для переважної більшості елементів (деталей, спряжень), відносно легко встановлюють за технічними критеріями, наприклад щодо зменшення цементаційна шару зубців шестерень, збільшення кроку ланцюгів (що викликає їх набігання на зірочку), поломки деталей, порушення технологічних функцій машини і т. д., то цього не можна сказати про допустиме значення параметра. Неправильне його встановлення виявляється з великим запізненням - по різкому збільшенню числа відмов елементів машин або витраті запасних частин.

Основне завдання, що потребує вирішення при організації і проведенні ремонту сільськогосподарської техніки, прогнозуванні її технічного стану є визначення допустимих і граничних параметрів деталей та спряжень.

Визначення граничного стану об'єктів – завдання досить складне, тому що, до деталей машини ставляться різні вимоги. Слід також відмітити, що до теперішнього часу методика розрахунку граничних значень зносів розроблена не в повному обсязі. На практиці в кожному конкретному випадку доводиться оцінювати чи можуть зношені деталі виконувати свої функції або їх треба замінити новими. Помилки у визначенні граничних величин зносу деталей, а отже, їх ресурсу викликають збільшення простоїв машин і витрат на їх ремонт, а в окремих випадках приводять до інших небажаних наслідків.

**Мета дослідження** – визначення формул та розробка методичних основ розрахунку оптимальних допустимих спрацювань деталей варіаторів за умови забезпечення безвідмовної експлуатації даного спряження чи вузла.

**Викладення основного матеріалу.** Параметричними відмовами варіаторів можна вважати граничний знос шківів і пасів, який призводить до неприпустимого ослаблення притискання паса до шківів.. При настанні граничного стану деталей і спряжень варіатора, їх подальша експлуатація повинна бути припинена, щоб уникнути аварійної поломки або різкого погіршення технічних характеристик. [1]

Враховуючи, що на реальний процес зміни параметрів впливають як конструктивні, так і експлуатаційні фактори, дослідження закономірності спрацювання деталей проводять шляхом мікрометражу деталей при відомому напрацюванні машин в умовах рядової експлуатації. На цій основі складають відповідні рівняння спрацювання залежно

від напрацювання.

Функцією, яка апроксимує зміни спрацювання залежно від напрацювання, слід приймати функцію:

$$U_{(t)} = m_v t^\alpha + U_1, \quad (1)$$

де  $U_{(t)}$  – середня величина спрацювання;

$m_v$  – середнє значення показника швидкості зміни величини спрацювання;

$t$  – напрацювання;

$\alpha$  – показник степеня;

$U_1$  – величина припрацювання.

Величина припрацювання істотно не впливає на результати розрахунків, а тому нею, як правило, нехтують. Показник степеня  $\alpha$  та середнє значення показника швидкості зміни величини спрацювання  $m_v$ , визначають методом найменших квадратів, за результатами обробки мікрометражних даних.

Допустимі при ремонті розміри деталей в спряженнях визначають виходячи з умови забезпечення безвідмовної роботи відремонтованого елемента протягом міжремонтного періоду на основі даних про закономірність спрацювання і граничні розміри деталей.

При капітальному ремонті (вузлів агрегатів) деталі підлягають вибраковуванню або відновленню навіть, коли їх ресурси ще використані неповністю, оскільки подальше використання цих деталей може призвести до відмови відремонтованих об'єктів. Показником, що регламентує необхідність заміни при капітальному ремонті техніки, є оптимальне допустиме відхилення параметра стану елемента (допустиме спрацювання деталі).

*Критеріями при визначенні оптимальних допустимих відхилень параметрів* (допустимих спрацювань) можуть бути: мінімум питомих витрат на одиницю напрацювання машин, мінімальна імовірність відмови елемента (максимальна безвідмовність), максимальний строк служби елемента та інше [2]. На основі цього приймається рішення про можливість використання деталі без її відновлення (заміни) за умови забезпечення надійної роботи відремонтованого об'єкта у міжремонтний період. Враховуючи це, а також переваги і недоліки того чи іншого критерію [2-4]. встановлено, що оптимальні допустимі при ремонті параметри технічного стану (допустимі спрацювання) визначаються за умови забезпечення максимальної безвідмовності відремонтованого елемента у міжремонтний період.

На підставі проведених досліджень та враховуючи відомі залежності [2], цільова функція оптимізації допустимих спрацювань за критерієм забезпечення заданої безвідмовності відремонтованого вузла у міжремонтний період матиме вигляд

$$q(U_d) = \min \left[ \frac{Q(U_d)t_M}{t_\phi(U_d)} \right], \quad 0 \leq U_d \leq U_c, \quad (2)$$

де  $q(U_d)$  – імовірність безвідмовної роботи елемента;

$Q(U_d)$  – імовірність відмови елемента на строк його служби залежно від допустимого спрацювання;

$t_M$  – міжремонтне напрацювання;

$t_\phi(U_d)$  – середній ресурс елемента, який фактично використовується, залежно від допустимого спрацювання;

$U_d, U_c$  – допустиме та граничне спрацювання елемента.

При розв'язанні задачі приймається, що постановка машин на ремонт здійснюється через визначені значення напрацювання, а граничні відхилення є постійною величиною.

Із зменшенням допустимого значення параметра величина імовірності відмови

зменшується значно швидше ніж середній ресурс. Тому максимальна імовірність безвідмовної роботи матиме місце при мінімальному значенні імовірності відмови.

При лінійній зміні параметра елемента і нормальному законі розподілу його ресурсу рівняння для визначення імовірності відмови має вигляд

$$Q(D_0) = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{D_0}^i e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

де  $i$  – порядковий номер міжконтрольного періоду, перед яким визначаються параметри технічного стану деталей;

$t$  – величина напрацювання;

$$D_0 = \frac{U_d}{U_r}; T_0 = \frac{T_{cp}}{t_m},$$

де  $T_{cp}$  – середній арифметичний ресурс елемента.

Для визначення імовірності відмови при степеневій функції зміна параметра, що має місце у нашому випадку, скористаємося формулою переводу

$$D_0 = \left(\frac{U_d}{U_r}\right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

і способом вирахування рівняння (3) через інтеграл імовірності [4].

Будемо мати

$$Q(D_0) = \left[ \Phi\left(\frac{i-T_0}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\frac{i-1}{\alpha} T_0}{\sigma}\right) \right], \quad (4)$$

де  $Q(D_0)$  — імовірність відмови елемента;

$\Phi$  — нормальна функція розподілу ресурсу елемента.

Мінімальне значення імовірності відмови за термін служби деталей буде у тому разі, коли після першого капітального ремонту в другому між контрольному періоді ( $i = 2$ ) відмов відремонтваного елемента не буде, тобто  $Q_2(D_0) = 0$ . Тоді

$$\frac{2-T_0}{\sigma} = \frac{\frac{i-1}{\alpha} T_0}{\sigma}, \text{ або } D_0 = 0,5^\alpha, \quad (5)$$

Допустиме відхилення параметра (допустиме спрацювання) при цьому буде

$$U_d = 0,5^\alpha U_r, \quad (6)$$

На підставі даних про величину показника  $\alpha$  наведено допустимі спрацювання спряжень у частках від граничного їх значення, табл. 1 [4].

Таблиця 1

Тип спряження	Допустиме спрацювання спряження
Нерухоме за рахунок тертя або допоміжних деталей спряження циліндричних, плоских, шліцьових, зубчастих поверхонь	$U_d = (0,47 - 0,54)U_r$
Рухоме з зворотно-поступальним тертям ковзання спряження циліндричних поверхонь	$U_d = (0,20 - 0,27)U_r$
Рухоме з тертям кочення з проковзуванням спряження зубчастих циліндричних поверхонь	$U_d = (0,20 - 0,43)U_r$

Граничне відхилення параметра (граничне спрацювання) визначається з використанням відомих методик [3].

При рівномірному спрацюванні протилежних поверхонь граничне спрацювання визначається по формулі:

$$U_r = (0.5 \dots 0.6)k_{gp}T_i, \quad (7)$$

де  $k_{gp}$  – опитно-статистичний коефіцієнт граничного спрацювання типового з'єднання деталей;

$T_i$  – допуск на розмір.

а при односторонньому спрацюванні – по формулі

$$U_r = k_{gp}T_i, \quad (8)$$

При нерівномірному спрацюванні протилежних поверхонь з урахуванням степені нерівномірності граничне спрацювання визначається по формулі

$$U_{gp} = (0.7 \dots 0.9)k_{gp}T_i, \quad (9)$$

Для визначення коефіцієнта граничного спрацювання спочатку визначають тип з'єднання відновлюваних деталей і відповідальність його одному з указаних типових з'єднань (таблиці 3) [3]. Потім визначають допуск посадок в з'єднанні відновлюваної деталі, тобто суму допусків контактуючих поверхонь. Граничне спрацювання робочих поверхонь деталей розраховують по одній із формул (8 – 9).

Чим точніше задане типове з'єднання деталей, тим менше по абсолютній величині граничне спрацювання, тим більше коефіцієнт граничного спрацювання і навпаки.

Виходячи з допустимих спрацювань типових спряжень визначають допустимі спрацювання контактуючих поверхонь деталей.

Перерозподіл величини спрацювання спряжень між деталями проводиться на основі даних про їх стійкість проти спрацювання (співвідношення спрацювання спряжених поверхонь), а при відсутності таких даних — шляхом розрахунків.

З існуючих розрахункових способів найбільш простим і логічним є розподіл допустимого спрацювання спряження прямо пропорційно допускам на розміри контактуючих поверхонь деталей.

У такому разі допустимі спрацювання деталей визначають за формулами

$$U_{da} = U_d \frac{T_d}{T_d + T_D}, \quad (10)$$

$$U_{dD} = U_d \frac{T_D}{T_d + T_D}, \quad (11)$$

де  $U_{da}$  — допустиме спрацювання вала;

$U_{dD}$  – допустиме спрацювання отвору;

$T_d, T_D$  – допуск на розмір відповідно вала і отвору.

Допуски на розмір деталей приймають за робочими кресленнями.

Оптимальні за прийнятим критерієм допустимі при ремонті значення розмірів деталей визначають за формулою:

$$P_d = P_n \pm U_{dd}, \quad (12)$$

де  $P_d$  – допустимий при ремонті розмір;

$P_n$  – номінальний розмір деталі;

$U_{dd}$  – допустиме спрацювання деталі.

Номінальні розміри деталей приймаються згідно з робочими кресленнями, а допустимі спрацювання визначають за формулами (10), (11).

У клинопасових варіаторах застосовуються евольвентні і прямокутні шліцьові з'єднання. Так як зміна розмірів шліців відбувається головним чином через зминання матеріалу, з якого вони виготовлені, основним критерієм надійності їх з'єднання є величина виникаючих в них напружень  $\sigma_{зм}$ . Відсутність зминання в шліцевому з'єднанні виражається залежністю:

$$\sigma_{см} = \frac{M_{кр}}{\psi l_3 R_{ср} F z'} \quad (13)$$

де  $M_{кр}$  – крутний момент;

$\psi$  — коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантаження на зубці з'єднання (за даними Б. С. Цораса  $\psi = 0,75$ );

$l_3$  — робоча довжина зуба, однакова з довжиною маточини, насаженої на зубці, см;

$R_{ср}$  — середній радіус зуба, що дорівнює: для прямокутних зубців  $R_{ср} = (D + d)/4$ , для евольвентних  $R_{ср} = d_d/2$ , де  $D$  — зовнішній діаметр;  $d_d$  — середній діаметр з'єднання;

$F$  — розрахункова площа дотикання зубців з'єднання, см<sup>2</sup>;

$z$  — число зубців у з'єднанні

Розрахунок робочої поверхні для прямокутних зубців здійснюється за формулою

$$F = \frac{(D-d)}{2} (h + r), \quad (14)$$

для евольвентних

$$F = 0.8m = 0.8d_d/z, \quad (15)$$

де  $h$  — висота фаски зуба при центруванні по  $D$ ;

$r$  — радіус заокруглення впадини для вихідного контура зубчатої рейки.

Допустимі напруження зминання  $\sigma_{зм}$  приймаються в залежності від умов експлуатації, характеру з'єднання і термообробки робочих поверхонь зубців:

для нерухомих шліцьових з'єднань:  $[\sigma]_{см} = (5 \cdot 10^7 - 20 \cdot 10^7) \text{ Н/м}^2$ ;

для рухливих з'єднань при нормальних умовах експлуатації  $[\sigma]_{см} = (10^7 - 2 \cdot 10^7) \text{ Н/м}^2$ ;

при важких умовах експлуатації  $[\sigma]_{см} = (3 \cdot 10^6 - 10^7) \text{ Н/м}^2$  [5].

Наведені розрахункові рекомендації є необхідними при перевірочному аналізі, проведеному з метою визначення можливості повторного використання деталей з шліцьовими елементами. Такий аналіз дозволяє судити про зміну міцності характеристик в зубцях шліцьових з'єднань. Однак основний вплив на зміну точності сполучень деталей надає величина зносу шліців. Численні експериментальні дослідження показали, що величина допустимого зносу шліців по ширині не повинна перевищувати значення

$$\Delta b = (0.05 - 0.08)b, \quad (16)$$

де  $b$  — ширина зуба прямокутного або евольвентного шліца по зовнішньому діаметру, мм.

Якщо знос шліців перевищує величину, зазначену в рівність (17), то такий стан вважається граничним.

#### Висновки:

1. Приведено теоретичне обґрунтування вивчення технічного стану деталей варіаторів.
2. Визначені критерії оптимальних допустимих відхилень параметрів (допустимих спрацювань).

3. Розроблено методичні основи визначення граничних і допустимих розмірів деталей клинопасових варіаторів при ремонті та прогнозуванні їх технічного стану за умови забезпечення заданої безвідмовності.

### Література

1. Кухтов В.Г. Лисенко С.В. Класифікація відмов та оцінка надійності деталей варіаторів зернозбиральних комбайнів. Науковий журнал. Технічний сервіс агропромислового та транспортного комплексів Харків. 2016. №6.
2. Михлин В.М. Прогнозирование технического состояния машин. М. Колос. 1976.
3. Методические указания по определению предельных и допустимых износов деталей и их соединений. 1988. М. ГОСНИТИ.
4. Молодик М.В. Ковальчук В.І. Бондаренко Г.П. Методичні основи визначення граничних і допустимих розмірів деталей при ремонті // Вісник аграрної науки, – 2001, №3.
5. В. И. Прейсман. Основы надежности сельскохозяйственной техники // Киев. «Вища школа». 1988.

### Summary

**V. Kuhtov., S. Lysenko.** Prognosis and optimization of boundary and administrative parameters of details of variators of combines

*The article gives the theoretical substantiation of the study of the technical condition of the details of the variables, the criteria for determining the optimal tolerances for the parameters of the tolerances, the methodical bases for determining the limit and admissible dimensions of the parts of the crop equipment variators during the repair and forecasting of its technical condition, provided that the given reliability is provided.*

**Keywords:** *technical condition, variator, permissible parameter value, marginal deviation, resource, conjugation, reliability.*

### References

1. V. Kuhtov. S. Lysenko. CLASSIFICATION OF REFUSAL AND ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF DETAILS OF VARIATORS OF GRAIN NUCLEAR COMBINES. Scientific Journal. Technical service of agroindustrial and transport complexes of Kharkiv. 2016. No. 6.
2. Mikhlin VM Forecasting of technical condition of machines. M. Kolos. 1976
3. Methodical instructions for determining the limit and permissible wear of parts and their compounds. 1988. M. GOSNITI.
4. Molodik MV Kovalchuk V.I. Bondarenko GP Methodical bases for determining the limit and admissible dimensions of parts during repair. // Bulletin of Agrarian Science, 2001, No. 3.
5. V. Prysman. Fundamentals of reliability of agricultural machinery. // Kiev. "High school". 1988.