

МІЦНІСТЬ І НАДІЙНІСТЬ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН В УМОВАХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

**О. М. Черниш, кандидат технічних наук
e-mail: mechanics@nauu.kiev.ua**

Анотація. Проведено аналітичну оцінку надійності відповідальних елементів машини як механічної системи при короткочасних випадкових перевантаженнях. Метод базується на аналізі імовірності досягнення небезпечного стану в умовах екстремального випадкового процесу перевантаження в розрахунковому інтервалі експлуатації.

Для цього випадкові параметри навантаження та міцності робочого елемента машини були представлені у вигляді функціональних залежностей узагальненого навантаження і узагальненої міцності від часу і була розглянута взаємодія цих двох функцій випадкових параметрів від часу.

При умові, що узагальнена міцність робочого елемента в розрахунковому інтервалі експлуатації є випадковою сталою величиною, швидкість зміни функції запасу міцності повністю визначається швидкістю зміни функції узагальненого навантаження. Це дає можливість визначити інтенсивність відмов як одиничного елемента так і декількох робочих елементів механічної системи та оцінити надійність такої системи із врахуванням імовірнісних аспектів розподілу пікових параметрів випадкового навантаження та параметрів міцності в умовах короткочасних перевантажень.

Даний похід приводить до підвищення точності розрахунків при прогнозуванні надійності та збільшення ресурсу роботи машин сільськогосподарського виробництва.

Ключові слова: запас міцності, надійність, відповідальні елементи сільськогосподарських машин, статистичний підхід, перевантаження

Постановка проблеми. Надійність та збільшення запасу міцності і ресурсу сільськогосподарських машин є однією із пріоритетних завдань сучасного машинобудування. Але при цьому деякі динамічні явища (нестационарні навантаження, вібрації, перевантаження) обмежують продуктивність і працездатність

машин. Отже для створення сільськогосподарських машин більшої ефективності та надійності необхідно розглядати нові принципи і технології, у тому числі й методи їх розрахунків [5–7, 11]. Такі методи повинні забезпечити в першу чергу міцність і надійність деталей і робочих елементів машин у процесі виконання ними заданих функцій.

Аналіз останніх досліджень. Розрахункові методи оцінки міцності та надійності за окремими критеріями розроблюються і вдосконалюються [2–4, 8, 12–15, 17, 18, 20]. Однак бажано застосувати комплексний підхід, який буде вести до розв'язку проблеми зниження металоємності та забезпечення надійної експлуатації деталей і відповідальних робочих елементів машин сучасної сільськогосподарської техніки. При цьому в умовах дії нестационарних навантажень працездатність робочих елементів машин залежить від технологічних параметрів виробничого процесу, умов середовища, фізичних властивостей використовуваних матеріалів і особливостей конструкційного виконання [1, 3, 9, 7, 14].

Крім цього важливим фактором для таких розрахунків є врахування випадкового характеру процесу навантаження, який залежить від умов експлуатації, а також від багатьох інших параметрів [10, 16, 19].

Отже особливої уваги заслуговує використання імовірнісного аналізу при визначенні критеріїв міцності і надійності досліджуваного об'єкта – робочого елемента машини із врахуванням його конструктивних особливостей, матеріалу і факторів, які пов'язані з експлуатаційними умовами. Цей підхід для розрахунків на міцність і надійність є перспективним і доцільним.

Мета досліджень. У даній роботі досліджувалась задача оцінки надійності роботи відповідальних елементів машин, що можуть перебувати під впливом короткочасних нестационарних навантажень із високим рівнем інтенсивності дії. Як правило, при таких навантаженнях питання про накопичування ушкоджень не розглядається. Отже задача полягала у відшуканні імовірності хоча б однократного досягнення небезпечного стану при реалізації екстремального випадкового процесу в розрахунковому інтервалі експлуатації T . При цьому випадкові параметри навантаження і параметри міцності робочого елемента машини треба представити вигляді функціональних залежностей узагальненого навантаження і узагальненої міцності від часу.

Результати досліджень. Для розв'язку поставленої задачі розрахункові випадкові параметри робочих елементів машин розділимо на дві групи [3].

У першу групу будуть входити параметри міцності, що відносяться до властивостей самої конструкції робочих елементів і які є узагальненою міцністю $\tilde{R}(t)$.

Другу групу будуть складати зусилля в робочих елементах від діючих навантажень. Ці параметри є узагальненим навантаженням $\tilde{F}(t)$. У загальному випадку експлуатації не тільки узагальнене навантаження $\tilde{F}(t)$, але й узагальнена міцність $\tilde{R}(t)$ являють собою випадкові функції часу t .

В результаті задача зводиться до розгляду взаємодії функцій $\tilde{F}(t)$ і $\tilde{R}(t)$ у розрахунковому часовому інтервалі експлуатації $T = T(t)$.

При відмові робочого елемента машини за період T буде справедливою нерівність:

$$\tilde{F}(t) > \tilde{R}(t). \quad (1)$$

Застосуємо випадкову функцію запасу міцності $\tilde{S}(t)$:

$$\tilde{S}(t) > \tilde{R}(t) - \tilde{F}(t). \quad (2)$$

Тоді відмовою буде вважатися отримання функцією $\tilde{S}(t)$ від'ємних значень:

$$\tilde{S}(t) < 0. \quad (3)$$

Знаючи характеристики випадкових функцій $\tilde{F}(t)$ і $\tilde{R}(t)$ – математичні очікування $m_F(t)$, $m_R(t)$ і кореляційні функції $K_F(t_1, t_2)$, $K_R(t_1, t_2)$ – можна визначити характеристики випадкової функції $\tilde{S}(t)$:

- математичне очікування $m_S(t) = m_R(t) - m_F(t)$;
- кореляційну функцію при відсутності взаємного кореляційного зв'язку $K_{FR}(t_1, t_2) = 0$, $K_S(t_1, t_2) = K_R(t_1, t_2) + K_F(t_1, t_2)$;
- дисперсію $D_S(t) = K_S(t) = D_R(t) + D_F(t)$.

Якщо вважати, що імовірність відмови при перевантаженні та пов'язана із цим втрата надійності робочого елемента машини, є досить малою, то може бути прийнята модель пуассонового виду.

Визначимо інтенсивність збурювань і функцію надійності для запасу міцності $\tilde{S}(t)$.

Оскільки збурення $\tilde{S}(t)$ відбувається у від'ємному напрямку, то середнє число від'ємних значень (за нульовим рівнем) в одиницю часу буде дорівнювати:

$$\bar{U}^-(0) = - \int_{-\infty}^0 \dot{S} \cdot p(0, \dot{S}) d\dot{S}, \quad (4)$$

де $p(0, \dot{S})$ – спільна щільність імовірностей функції запасу міцності $\tilde{S}(t)$ і її похідної $\dot{\tilde{S}}(t)$ у кожний момент часу t .

При цьому:

$$\dot{\tilde{S}}(t) = \frac{d\tilde{S}(t)}{dt} = \frac{d\tilde{R}(t)}{dt} - \frac{d\tilde{F}(t)}{dt}. \quad (5)$$

Від'ємне значення у виразі (4) означає від'ємну швидкість $\tilde{S} < 0$ при русі вниз за нульовий рівень.

В інтервалі експлуатації робочого елемента конструкції машини будемо вважати його узагальнену міцність $\tilde{R}(t)$ випадковою сталою величиною $\tilde{R}(t) = \tilde{R}$.

Тоді запас міцності можна записати у вигляді:

$$\tilde{S}(t) = \tilde{R} - \tilde{F}(t), \quad (6)$$

і в результаті одержимо:

$$\dot{\tilde{S}}(t) = \frac{d\tilde{R}}{dt} - \frac{d\tilde{F}(t)}{dt} = -\dot{\tilde{F}}(t), \quad (7)$$

де: $\frac{d\tilde{R}}{dt} = 0$.

Це означає, що швидкість зміни функції запасу міцності повністю визначається швидкістю зміни функції узагальненого навантаження

$$\int_{-\infty}^0 \dot{S} \cdot p_{\dot{S}}(\dot{S}) d\dot{S} = \int_{\infty}^0 \dot{F} \cdot p_{\dot{F}}(\dot{F}) d\dot{F}, \quad (8)$$

Тоді інтенсивність відмов визначиться виразом:

$$\bar{U}^-(0) = -p_S(0) \int_{\infty}^0 \dot{F} \cdot p_{\dot{F}}(\dot{F}) d\dot{F}, \quad (9)$$

де: $p_S(0)$ и $p_{\dot{S}}(\dot{S})$ – відповідно щільності імовірностей функції запасу міцності і її похідної у момент часу t .

В результаті функція надійності (імовірність безвідмовної роботи робочого елемента машини як індивідуального об'єкту з урахуванням конструктивних особливостей цього об'єкту і діючих на нього навантажень за час експлуатації) буде мати вигляд

$$P(T) = [1 - H_S(0|R)] \exp \left[- \int_{\infty}^0 \bar{U}^-(0) dt \right], \quad (10)$$

де: $H_S(0|R)$ – умовна імовірність відмови конструкції при $t = 0$.

Вирази (1)-(10) можна використати для систем, надійність яких дорівнює надійності найбільш навантаженого робочого елемента.

Відповідно функція надійності багатоелементної системи залежить від надійності всіх її частин.

Якщо розглянути відповідальний робочий елемент машини як деяку механічну систему, що має m частин, то умовну імовірність відмови багатоелементної системи в першому наближенні можна визначити як:

$$H(t|R) \approx \sum_{k=1}^m \int_0^t \exp \left[-\frac{(\bar{r}_k - \bar{f}_k)^2}{2\sigma_{fk}^2} \right] \frac{\omega_k}{2\pi} d\tau, \quad (11)$$

де: $f_k(t)$, $r_k(t)$ – відповідно параметри узагальненого навантаження і міцності k -го елемента системи.

При цьому будемо вважати, що параметри узагальненого навантаження $f_k(t)$ являють собою стаціонарні або квазістаціонарні диференційовані нормальні процеси із математичними очікуванням $\bar{f}_k(t) \gg 0$, дисперсією $\sigma_{fk}^2(t)$ і ефективною частотою $\omega_k(t)$, які є повільно мінливими у порівнянні з реалізаціями функціями часу t . Відповідно параметри узагальненої міцності також будуть повільно мінливими нормальними процесами з математичними очікуванням $\bar{r}_k(t) \gg 0$ і дисперсією $\sigma_{rk}^2(t)$, коли:

$$\frac{\sigma_{rk}^2 f_k + \sigma_{fk}^2 r_k}{\sigma_{rk} \sigma_{fk} \sqrt{\sigma_{rk}^2 \sigma_{fk}^2}} \gg 1, \quad (12)$$

і математичне очікування числа відхилень для k -го елемента буде $\frac{\omega_k}{2\pi}$. Із урахуванням вищезгаданого вираз повної імовірності відмови буде мати наступний вигляд:

$$H(t) \approx \sum_{k=1}^m \int_0^t \frac{\sigma_{fk}}{\sqrt{\sigma_{rk}^2 + \sigma_{fk}^2}} \exp \left[-\frac{(\bar{r}_k - \bar{f}_k)^2}{2(\sigma_{rk}^2 + \sigma_{fk}^2)} \right] \frac{\omega_k}{2\pi} d\tau. \quad (13)$$

Отже надійність відповідальних елементів машини як багатоелементної механічної системи буде відповідати наступній умові:

$$H(t) \leq H_*(t), \quad [t \in (0, T_*)], \quad (14)$$

де: T_* – встановлений термін часу експлуатації, $H_*(t)$ – нормативний ризик багатоелементної системи, який у загальному випадку також залежить від часу.

Вирази (11)–(14) визначають основні співвідношення розрахунків робочих елементів машини як багатоелементної механічної системи на надійність: на ймовірність відмови залежно від статистичних характеристик навантаження і міцності, від числа елементів системи і від встановленого терміну експлуатації T_* .

Висновок. Взаємодія пікових параметрів випадкового навантаження та параметрів міцності відповідальних робочих елементів машини, як багатоелементної механічної системи, представлені у вигляді функціональних залежностей узагальненого навантаження $\tilde{F}(t)$ і узагальненої міцності $\tilde{R}(t)$ від часу. Це дозволяє оцінити надійність таких систем із врахуванням імовірнісних аспектів розподілу даних залежностей в умовах короточасних перевантажень. Даний похід приводить до підвищення точності розрахунків при прогнозуванні надійності та збільшення ресурсу роботи відповідальних деталей і елементів машин сільськогосподарського виробництва.

Список літератури

1. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Сопротивление материалов. Москва. 2003. 560 с.
2. Бобчук М., Коваль С., Погорілий В. Науково-методичні принципи забезпечення надійності вітчизняних зернозбиральних комбайнів. Техніка АПК. 2004. № 4-5. С. 8—10.
3. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. Москва. 1990. 448 с.
4. Болотин В. В., Чирков В. П. Асимптотические оценки для вероятности безотказной работы по моделям типа нагрузка-сопротивление. Проблемы машиностроения и надежности машин. 1992. №6. С. 3—10.
5. Борис М. М., Черниш О. М., Яременко В. В. Створення бурякозбиральних машин сучасного технічного рівня. Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха. 2013. Вип. 98. С. 515—522.
6. Булгаков В. М., Дубровін В. О., Головач І. В., Черниш О. М. Від землеробської механіки до сучасних методів механіки та теорії механізмів і машин для високотехнологічного сільського господарства. Науковий вісник Луганського нац. аграрного університету: Серія: технічні науки. № 29. Луганськ. 2011. С. 318—333.
7. Бутаков Б. Пути повышения надежности деталей машин. Motorization and power industry in agricultural. Motrol. 2007. Vol. 9A. P. 38—47.
8. Волков П. М., Баловнев Г. Г., Корешков В. И. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин на прочность и надежность. Москва. 1977. 310 с.
9. Горшков А. Г., Трошин В. Н., Шалашилин В. И. Сопротивление материалов. Москва. 2005. 544 с.
10. Гусев А. С., Светлицкий В. А. Расчет конструкций при случайных воздействиях. Москва. 1984. 240 с.
11. Дубровін В. О., Булгаков В. М., Головач І. В., Черниш О. М. Перспективи розвитку сучасних механізмів і машин для агропромислового комплексу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка і енергетика АПК. Вип. 166. Ч. 1. Київ. 2011. С. 9—20.
12. Кравченко И. Н., Зорин В. А., Пучин Е. А. Основы надежности машин. Ч. 1. Москва. 2007. 224 с.
13. Кравченко И. Н., Зорин В. А., Пучин Е. А. Основы надежности машин. Ч. 2. Москва. 2007. 260 с.
14. Кулик Н. С., Кучер А. Г., Мильцов В. Е. Математические модели накопления поврежденной и трещиностойкости при действии статических и циклических нагрузок. Вісник Національного аграрного університету. Київ. 2009. № 3. С. 3—23.

15. *Михлин В. М.* Управление надежностью сельскохозяйственной техники. Москва. 1984. 335 с.
16. *Светлицкий В. А.* Статистическая механика и теория надежности. Москва. 2004. 504 с.
17. *Степнов М. Н.* Новый подход к расчету коэффициента запаса прочности при циклическом нагружении. Вестник машиностроения. 2004. № 11. С. 14—17.
18. *Черниш О. М.* Визначення запасу міцності для вуглецевих сталей при циклічному навантаженні. Праці Таврійського державного агротехнічного університету. Мелітополь. 2012. Вип. 12. Т. 1. С. 185—191.
19. *Черныш О. Н.* Оценка усталостной прочности рабочих элементов сельскохозяйственных машин. Zemes ukio inzinerija / Mokslo Darbai 45(3). Aleksanras stulginskis university. Kauno r., Lithuania. 2013. Mokslo Darbai 45(2). С. 51—58.
20. *Яременко В. В., Черниш О. М.* Надійність гідравлічних приводів зернозбиральних комбайнів. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. Дослідницьке. 2013. Вип. 17 (31). С.332—347.

References

1. *Aleksandrov A. V., Potapov V. D., Derzhavin. B. P.* (2003). Mechanics of materials. Moscow. 560.
2. *Babchuk N., Koval S., Pogorelov V.* (2004). Methodological principles of providing of reliability of domestic combine harvesters. Machinery APK. No. 4-5. 8-10.
3. *Bolotin V. V.* (1990). Resource of machines and structures. Moscow. 448.
4. *Bolotin V. V., Chirkov V. P.* (1992). Asymptotic estimates for the probability of model type load-resistance. Problems of mechanical engineering and reliability of machines. No. 6. 3-10.
5. *Boris M. M., Blackie, A. M., Yaremenko V. V.* (2013). Establishment of the sugar beet machinery of the modern technological level. Mechanization and electrification of agriculture. Glevaha. Vol. 98. 515-522.
6. *Bulgakov V. M., Dubrovin V. A., Golovach I. V., Chernysh, A. M.* (2011). From agricultural mechanics to modern methods of mechanics and theory of mechanisms and machines for high-tech agriculture. Scientific Bulletin of Lugansk NAT. Agricultural University: Series: technical sciences. No. 29. Lugansk. 318-333.
7. *Butakov B.* (2007). Ways of improving the reliability of machine parts. Motorization and power industry in agricultural. Motrol. Vol. 9A. 38-47.
8. *Volkov P. V., Balovnev G. G., Koreshkov V. S.* (1977). Fundamentals of theory and calculation of agricultural machines for strength and reliability. Moscow. 310.
9. *Gorshkov A. G., Troshin V. N., Shalashilin V. S.* (2005). Mechanics of materials. Moscow. 544.
10. *Gusev A. S., Svetlitsky V. A.* (1984). Calculation of structures under random influences. Moscow. 240.
11. *Dubrovin V. A., Bulgakov V. M., Golovach I. V., Chernysh A. M.* (2011). Prospects of development of modern mechanisms and machines for use in agriculture. Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: electronics and energetics, agriculture. Vol. 166. Part 1. Kiev. 9-20.
12. *Kravchenko I. N., Zorin V. A., Puchin E. A.* (2007). Bases of cars reliability. Part 1. Moscow. 224.
13. *Kravchenko I. N., Zorin V. A., Puchin E. A.* (2007). Bases of cars reliability. Part 2. Moscow. 260.

14. Kulik N. S., Kucher A. G., Meltsov V. E. (2009). Mathematical models of damage accumulation and fracture toughness for long-lived static and cyclic loads. Bulletin of National agrarian university. Kiev. No. 3. 3-23.
15. Mikhlina V. M. (1984). Managing the reliability of farm equipment. Moscow. 335.
16. Svetlitskiy V. A. (2004). Statistical mechanics and the theory of reliability. Moscow. 504.
17. Stepanov M. N. (2004). New approach to the calculation of factor of safety under cyclic loading. Vestnik mashinostroeniya. No. 11. 14-17.
18. Chernysh O. M. (2012). Determination of the margin of safety for carbon steels under cyclic loading. Proceedings of Tavria State Agrotechnical University. Melitopol. Vol. 12. Vol. 1. 185-191.
19. Chernysh O. M. (2013). Evaluation of fatigue strength of working elements of agricultural machines. Zemes ukio inzinerija / Mokslo Darbai 45(3). Aleksanras stulginskis university. Kauno r., Lithuania. Mokslo Darbai 45(2). 51-58.
20. Yaremenko V. V., Chernysh A. M. (2013). Reliability of hydraulic drives for harvester-threshers. Technical and technological aspects of the development and testing of new equipment and technologies for agriculture of Ukraine. Vol. 17 (31). 332-347.

ПРОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ ПЕРЕГРУЗОК

О. Н. Черныш

Аннотация. Проведена аналитическая оценка надежности ответственных элементов машины как механической системы при кратковременных случайных перегрузках. Метод базируется на анализе вероятности достижения опасного состояния в условиях экстремального случайного процесса перегрузки в расчетном интервале эксплуатации.

Для этого случайные параметры нагрузки и прочности рабочего элемента машины были представлены в виде функциональных зависимостей обобщенной нагрузки и обобщенной прочности от времени и было рассмотрено взаимодействие этих двух функций случайных параметров от времени.

При условии, что обобщенная прочность рабочего элемента в расчетном интервале эксплуатации является случайной постоянной величиной, скорость изменения функции запаса прочности полностью определяется скоростью изменения функции обобщенной нагрузки. Это дает возможность определить интенсивность отказов как единичного элемента так и нескольких рабочих элементов механической системы и оценить надежность такой системы с учетом вероятностных аспектов распределения пиковых параметров случайного нагружения и параметров прочности в условиях кратковременных перегрузок.

Данный подход приводит к повышению точности расчетов при прогнозировании надежности и увеличению ресурса работы машин сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова: запас прочности, надежность, ответственные элементы сельскохозяйственных машин, статистический подход, перегрузки

DURABILITY AND RELIABILITY OF RESPONSIBLE ELEMENTS OF AGRICULTURAL MACHINES IS IN CONDITIONS OF OVERLOADS

O. M. Chernysh

Abstract. *The analytical estimation of reliability of responsible elements of machine is conducted as a mechanical system at brief casual overloads. A method is based on the analysis of probability of achievement of the dangerous state in the conditions of extreme casual process of overload in the calculation interval of exploitation.*

For this purpose the casual parameters of loading and durability of working element of machine were presented as functional dependences of the generalized loading and generalized durability from time and there was the considered co-operation these two functions of casual parameters from time.

On condition that the generalized durability of working element in the calculation interval of exploitation is a casual permanent size, speed of change of function of margin of safety is fully determined speed of change of function of the generalized loading. It enables to define intensity of refuses as a single element so a few workings elements of the mechanical system and to estimate reliability of such system recognition probabilistic aspects of distributing of parameters of spades of the casual loading and parameters of durability in the conditions of brief overloads.

This hike results in the increase of exactness of calculations at prognostication of reliability and increase of resource of work of machines of agricultural production.

Key words: *safety margin, reliability, responsible elements of agricultural machines, the statistical approach, overloads*

УДК 514.18

ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЙ І ПРИСКОРЕНЬ ОКРЕМИХ ТОЧОК ПЛОСКИХ МЕХАНІЗМІВ З ДОПОМОГОЮ ТРИГРАННИКА ФРЕНЕ

**С. Ф. Пилипака, доктор технічних наук
А. В. Чепіжний, аспірант***

Анотація. *Для визначення траєкторій руху окремих точок, які належать ланкам плоского механізму, можна застосовувати*

*Науковий керівник – доктор технічних наук С. Ф. Пилипака

© С. Ф. Пилипака, А. В. Чепіжний, 2017