



## ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 539.432:620.1

**Булгаков В.М.**

*д.т.н., професор, академік НААН України, кафедра механіки  
Факультет конструювання та дизайну  
Національний університет біоресурсів і природокористування України  
Київ, Україна*

*E-mail: bulgakov@nubip.edu.ua*

**Черниш О.М.**

*к.т.н., доцент, кафедра механіки  
Факультет конструювання та дизайну  
Національний університет біоресурсів і природокористування України  
Київ, Україна*

*E-mail: chernysh@nubip.edu.ua*

**Шимко Л.С.**

*к.т.н., доцент, кафедра технічного сервісу та інженерного менеджменту  
ім. М.П. Момотенка  
Механіко-технологічний факультет  
Національний університет біоресурсів і природокористування України  
Київ, Україна*

*E-mail: shymkolyuba@ukr.net*

### ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

#### *Анотація*

*В умовах дії нестационарних навантажень працездатність робочих елементів машини залежить від багатьох технологічних параметрів виробничого процесу, а тому проведення подібних експериментальних досліджень вимагає значних витрат. Отже, моделювання технологічних процесів сільськогосподарських машин і аналітичні методи визначення критеріїв надійності є важливими задачами сільськогосподарського машинобудування.*

*В роботі запропоновано аналітичний метод оцінки надійності робочих елементів машини як механічної системи при короткочасних випадкових нестационарних навантаженнях. Для цього застосовані критерії оцінки міцності і довговічності робочих елементів машин із врахуванням статистичного підходу до розрахунків. При аналізі граничного стану робочого елемента машини використані імовірнісні характеристики міцності та навантаження.*

*Метод оцінки надійності базується на визначенні імовірності досягнення небезпечного стану в умовах екстремального випадкового процесу навантаження в розрахунковому інтервалі експлуатації. Тут випадкові параметри навантаження та міцності робочих елементів машини представлені у вигляді функціональних залежностей узагальненого навантаження і узагальненої міцності від часу.*

*Результати застосування такого підходу дозволяє підвищити надійність та збільшити ресурс роботи у сільськогосподарському виробництві як окремих відповідальних робочих елементів так і усієї машини у цілому.*

**Ключові слова:** *надійність, робочі елементи сільськогосподарських машин, статистичний підхід, нестационарне навантаження.*

**Вступ.** Надійність сільськогосподарських машин є однією із пріоритетних завдань сучасного машинобудування. Адже нестационарні навантаження, вібрації, перевантаження можуть суттєво обмежити їх працездатність.

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 у першу чергу міцність і надійність деталей і робочих елементів машин у процесі виконання ними заданих функцій. Розв'язок цих питань відповідає основним задачам розвитку сучасних сільськогосподарських машин агропромислового комплексу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розрахункові методи оцінки міцності та надійності за окремими критеріями постійно розроблюються і вдосконалюються [2-4, 8, 12-15, 17, 18, 20]. Але бажано застосувати комплексний підхід, який приведе до розв'язку проблеми зниження металоємності та забезпечення надійної експлуатації сучасної сільськогосподарської техніки.

В умовах дії нестационарних навантажень працездатність робочих елементів машини залежить від багатьох технологічних параметрів виробничого процесу, умов середовища, фізичних властивостей використовуваних матеріалів і особливостей конструкційного виконання [1, 3, 9, 7, 14]. При цьому складність проведення проектних розрахунків сільськогосподарської техніки полягає в тому, що для розрахунку окремих параметрів машини використовують переважно методи теорії рівноваги механічних систем. Також важливим фактором тут є врахування випадкового характеру процесу навантаження, який залежить від умов експлуатації і багатьох інших параметрів. [10, 16, 19].

На підставі статистичних підходів у першому наближенні можна визначити основні параметри сільськогосподарської машини, де суттєве значення мають випробування експериментальних зразків машини у робочих умовах, після чого дослідні зразки потрібно вдосконалити і знову випробувати. Але проведення подібних експериментальних досліджень вимагає значних витрат на виготовлення експериментальних натурних зразків і багато часу на проведення сезонних випробувань. Це ускладнює процес створення оптимального варіанту машини і обмежує використання отриманих результатів.

У зв'язку з цим виникає необхідність у моделюванні технологічних процесів сільськогосподарських машин, а також потреба врахування внутрішньої структури досліджуваних процесів і повного математичного їх опису та виконання розрахунків із використанням імовірнісного аналізу при визначенні критеріїв надійності робочих елементів машини із врахуванням конструктивних особливостей, матеріалу і факторів, які пов'язані з експлуатаційними умовами. Такий підхід разом із впровадженням системи комп'ютерного проектування дозволяє розглядати традиційний комплекс етапів проектних розрахунків як єдину задачу у всій її складності взаємозв'язків.

**Мета.** Для дослідження проблеми оцінки надійності сільськогосподарських машин була поставлена мета – використати імовірнісний підхід для аналізу граничного стану робочих елементів сільськогосподарських машин із врахуванням їх конструктивних і експлуатаційних факторів та розглянути розрахункову модель оцінки міцності і

довговічності на основі використання імовірнісних характеристик навантаження і міцності.

**Методологія досліджень.** У даній роботі при досліджувалась надійність роботи відповідальних елементів машин, що перебувають під впливом короточасних нестационарних навантажень із високим рівнем інтенсивності дії. Як правило, при таких навантаженнях питання про накопичування ушкоджень не розглядається. Задача полягає у відшуванні ймовірності 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 можуть бути представлені у вигляді функціональних залежностей узагальненого навантаження і узагальненої міцності від часу.

**Результати.** Для розв'язку поставленої задачі розглянемо відповідальний робочий елемент машини як деяку механічну систему. При цьому розрахункові випадкові параметри цього робочого елемента машини розділимо на дві основні групи [3].

В одну групу будуть входити параметри міцності, що відносяться до властивостей самої конструкції робочого елемента і які є узагальненою міцністю  $r_k$ .

Другу групу будуть складати зусилля в робочому елементі машини від діючих навантажень. Ці параметри будемо вважати узагальненим навантаженням  $f_k$ .

В результаті випадкові процеси навантаження і працездатності робочих елементів машин у загальному вигляді будуть представлені у вигляді функціональних залежностей узагальненої міцності  $r_k$  та узагальненого навантаження  $f_k$  від часу. Дані процеси  $r_k$  і  $f_k$  в інтервалі часу експлуатації робочого елемента машини можуть бути схематизовані таким чином, щоб отримані розрахункові залежності стали практично прийнятними для використання.

Якщо динамічний процес навантаження нестационарний, то у першому наближенні при малому прирощенні часу, його можна замінити малими відрізками стаціонарних процесів із середніми значеннями параметрів нестационарного процесу. Отриманий таким чином стаціонарний процес можна описати за допомогою функції розподілення випадкових характеристик навантаження. При цьому у загальному випадку експлуатації машини не тільки узагальнене навантаження  $f_k$ , але й узагальнена міцність  $r_k$  її робочих елементів являються випадковими функціями часу  $t$ .

В результаті задача зводиться до розгляду взаємодії функцій узагальненого навантаження  $f_k$  і узагальненої міцності  $r_k$  у розрахунковому часовому інтервалі експлуатації  $T = T$ .

Застосуємо також випадкову функцію запасу міцності  $S$ :

$$S > r_k - f_k. \quad (1)$$

Відмовою робочого елемента машини будемо вважатися отримання функцією  $S$  від'ємних значень.

Знаючи характеристики випадкових функцій  $f_k$  і  $r_k$  – математичні очікування  $m_{f_k}$ ,  $m_{r_k}$  і кореляційні функції  $K_{f_k}(t_1, t_2)$ ,  $K_{r_k}(t_1, t_2)$  – можна визначити характеристики випадкової функції  $S$ .

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

$$H_k \approx \sum_{k=10}^m \int_0^t \exp \left[ -\frac{\omega_k - \bar{f}_k}{2\sigma_{f_k}^2} \right] \frac{\omega_k}{2\pi} dt, \quad (2)$$

де  $f_k$  – відповідно параметри узагальненого навантаження і міцності  $k$ -го елемента системи.

При цьому будемо вважати, що параметри узагальненого навантаження  $f_k$  являють собою стаціонарні або квазістаціонарні диференційовані нормальні процеси із математичними очікуванням  $\bar{f}_k >> 0$ , дисперсією  $\sigma_{f_k}^2$  і ефективною частотою  $\omega_k$ , які є повільно мінливими у порівнянні з реалізаціями функціями часу  $t$ .

Відповідно параметри узагальненої міцності також будуть повільно мінливими нормальними процесами з математичними очікуванням  $\bar{r}_k >> 0$  і дисперсією  $\sigma_{r_k}^2$  коли

$$\frac{\sigma_{r_k}^2 f_k + \sigma_{f_k}^2 r_k}{\sigma_{r_k} \sigma_{f_k} \sqrt{\sigma_{r_k}^2 + \sigma_{f_k}^2}} \gg 1, \quad (3)$$

і математичне очікування числа відхилень для  $k$ -го елемента буде  $\frac{\omega_k}{2\pi}$ .

Із урахуванням вищезгаданого вираз повної ймовірності відмови буде мати наступний вигляд

$$H_k \approx \sum_{k=10}^m \int_0^t \frac{\sigma_{f_k}}{\sqrt{\sigma_{r_k}^2 + \sigma_{f_k}^2}} \exp \left[ -\frac{\omega_k - \bar{f}_k}{2(\sigma_{r_k}^2 + \sigma_{f_k}^2)} \right] \frac{\omega_k}{2\pi} dt. \quad (4)$$

Отже надійність  $H_i$  відповідального елемента машини як багатоелементної механічної системи буде відповідати наступній умові:

$$H_i \leq H_* \quad \text{де } \mathbf{I} \in \mathbf{Q}, T_* - \quad (5)$$

де  $T_*$  – встановлений термін часу експлуатації,  $H_*$  – 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  $T_*$ .

У загальному випадку структурна схема надійності усієї машини може бути представлена як послідовне з'єднання усіх її складових робочих елементів.

При цьому ймовірність безвідмовної роботи машини  $H$  найпростіше визначити добутком ймовірностей безвідмовної роботи її складових елементів:

$$H = H_1 \cdot H_2 \cdot \dots \cdot H_n. \quad (6)$$

**Висновки і перспективи.** Отже, для аналітичної оцінки надійності робочих елементів сільськогосподарських машин в умовах дії знакозмінних динамічних навантажень враховані випадкові параметри процесу навантаження робочого елемента та його працездатність. При цьому взаємодія пікових параметрів випадкового навантаження та параметрів міцності робочих елементів машини представлені у вигляді функціональних залежностей узагальненого навантаження  $f_k$  і узагальненої міцності

$r_k$  від часу. Такі розрахунки дозволяють оцінити надійність як окремого елемента, так і усієї машини як механічної системи із врахуванням імовірнісних аспектів розподілу даних залежностей в умовах дії короткочасних переважань. Даний підхід приводить до підвищення точності розрахунків при прогнозування надійності та збільшення ресурсу роботи машин у сільськогосподарському виробництві.

#### Список використаних джерел

1. Александров А.В. Сопротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин ; под ред. А.В. Александрова. Москва : Высш. шк., 2003. – 560 с.
2. Бобчук М. Науково-методичні принципи забезпечення надійності вітчизняних зернозбиральних комбайнів / Бобчук М., Коваль С., Погорілий В., та ін. *Техніка АПК*. 2004, № 4-5. С. 8-10.
3. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. Москва : Машиностроение, 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: Міжвідомчий тематичний наук. збірник*. Глеваха : ННЦ «ІМЕСГ» НААН України, 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. *Наук. вісник Луганського нац. аграрного університету: Серія «Технічні науки»*. Спец. вип. 2011. № 29. С. 318-333.
7. Бутаков Б. Пути повышения надежности деталей машин. *Motorization and power industry in agricultural. MOTROL*. 2007. V.9A. P.38-47.
8. Волков П.М. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин на прочность и надежность / П.М. Волков, Г.Г. Баловнев, В.И. Корешков и др. Москва : Машиностроение, 1977. 310 с.
9. Горшков А.Г., Трошин В.Н., Шалашин В.И. Сопротивление материалов. Москва : Физматлит. 2005. 544 с.
10. Гусев А.С., Светлицкий В.А. Расчет конструкций при случайных воздействиях. Москва : Машиностроение. 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 НУБіП України: Серія «Техніка і енергетика АПК»*. 2011. Вип.166. Ч.1. С. 9-20.
12. Кравченко И.Н. Основы надежности машин. Часть 1 / И.Н. Кравченко, В.А. Зорин, Е.А. Пучин и др. Москва : Изд-во. 2007. 224 с.
13. Кравченко И.Н. Основы надежности машин. Часть 2 / И.Н. Кравченко, В.А. Зорин, Е.А. Пучин и др. Москва : Изд-во. 2007. 260 с.
14. Кулик Н.С., Кучер А.Г., Мильцов В.Е. Математические модели накопления повреждений и трещиностойкости при действии статических и циклических нагрузок. *Вісник НАУ*. 2009. № 3. С. 3–23.
15. Михлин В.М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники. Москва : Колос. 1984. 335 с.
16. Светлицкий В.А. Статистическая механика и теория надежности. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 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. *Зб. наук. праць Таврійського державн. агротехнічного ун.-ту*. Вип.12. Т. I. 2012. С. 185–191.
19. Черныш О.Н. Оценка усталостной прочности рабочих элементов сельскохозяйственных машин. *Zemes ukio inžinerija / 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* : Зб. наук. Праць. 2013. Вип. 17 (31). С. 332–347.

Дата надходження статті до редакції : 09.01.2018  
Рецензування 29.01.2018 Прийняття в друк: 20.05.2018

**Bulgakov V.M.**

*Dr. Sc.(Techn), Professor  
Academician of the NAAS of Ukraine,  
Department of mechanics  
Faculty of Design and Engineering  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
Kyiv, Ukraine*

**E-mail:** bulgakov@nubip.edu.ua

**Chernysh O.N.**

*PhD(Techn), Associate Professor  
Department of mechanics, Faculty of Design and Engineering  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
Kyiv, Ukraine*

**E-mail:** chernysh@nubip.edu.ua

**Shymko L.S.**

*PhD (Techn), Associate Professor  
Department of technical service and engineering management in the name of M.P. Momotenko,  
Mechanical and Technological Faculty  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
Kyiv, Ukraine*

**E-mail:** shymkolyuba@ukr.net

## RELIABILITY OF AGRICULTURAL MACHINES IN TERMS OF NON-STATIONARY LOADINGS

### Abstract

*In terms of non-stationary loadings the capacity of machine workings elements depends on many technological parameters of production process, and that is why such experimental research requires considerable charges. Consequently, a design of technological processes of agricultural machines and analytical methods of determination of reliability criteria is the important tasks of agricultural engineering.*

*The analytical method of reliability estimation of machine workings elements is in-process offered as a mechanical system at the brief casual non-stationary loadings. The applied criteria of estimation of durability and longevity of workings elements of machines are characterized. To analyze the maximum state of working element of machine the probable descriptions of durability and loading are used.*

*The method of estimation of reliability is based on determination of probability of achievement of the dangerous state in the conditions of extreme casual process of loading in the calculation of interval of exploitation. The casual parameters of loading and durability of workings elements of machine are presented as functional dependences of the generalized loading and generalized durability from time.*

*Reliability allows to promote the results of application of such approach and to increase the resource of work in agricultural production as separate responsible workings elements so all machine on the whole.*

**Keywords:** *reliability, workings elements of agricultural machines, statistical approach, non-stationary loading.*

## References

1. Aleksandrov, A.V., Potapov, V.D. & Derzhavyn B.P. (2003). Soprotivlenye materialov (Ed. A.V. Aleksandrov). Moscow : Vyssh. shkola. [in Russ.]
2. Bobchuk, M., Koval, S., Pohorilyi V. et al. (2004). Naukovo-metodychni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti vitchyznianskykh zernozbyralnykh kombainiv. *Tekhnika APK*, 4-5, 8-10.
3. Bolotyn, V.V. (1990). *Resurs mashyn y konstruksyi*. Moscow : Mashynostroenyie. [in Russ.]
4. Bolotyn, V.V., & Chyrkov, V.P. (1992). Asymptotycheskye otsenky dlia veroiatnosti bezotkaznoi raboty po modeliam tyipa nahruzka-soprotivlenye. *Problemy mashynostroeniya y nadezhnomy mashyn*, 6, 3-10. [in Russ.]
5. Borys, M.M., Chernysh, O.M., & Yaremenko, V.V. (2013). Stvorennia buriakozbyralnykh mashyn suchasnoho tekhnichnoho rivnia. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva: Mizhvidomchyi tematychnyi nauk. zbirnyk*, 98, 515-522. [in Ukr.]
6. Bulhakov, V.M., Dubrovin, V.O., Holovach, I.V., & Chernysh, O.M. (2011). Vid zemlerobskoi mekhaniky do suchasnykh metodiv mekhaniky ta teorii mekhanizmiv i mashyn dlia vysokotekhnolohichnoho silskoho hospodarstva. *Nauk. visnyk Luhanskoho nats. ahromoho universytetu: Seriiia «Tekhnichni nauky»*. Spets. vyp., 29, 318-333. [in Ukr.]
7. Butakov, B. (2007). Puty povysheniya nadezhnomy detalei mashyn. *Motorization and power industry in agricultural. MOTROL*, 9A, 38-47. [in Russ.]
8. Volkov, P.M., Balovnev, H.H., Koreshkov, V.Y. et al (1977). *Osnovy teoryy y rascheta sel'skokhoziaistvennykh mashyn na prochnost y nadezhnost*. Moscow : Mashynostroenyie. [in Russ.]
9. Horshkov, A.H., Troshyn, V.N., & Shalashylyn, V.Y. (2005). Soprotivlenye materialov. Moscow : Fyzmatlyt [in Russ.]
10. Husev, A.S., & Svetlytskyi, V.A. (1984). Raschet konstruksyi pry sluchainykh vozdeistviyakh. Moscow : Mashynostroenyie [in Russ.]
11. Dubrovin, V.O., Bulhakov, V.M., Holovach, I.V., & Chernysh, O.M. (2011). Perspektyvy rozvytku suchasnykh mekhanizmiv i mashyn dlia ahropromyslovoho kompleksu. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy: Seriiia «Tekhnika i enerhetyka APK»*, 166, p.1, 9-20. [in Ukr.]
12. Kravchenko, Y.N., Zoryn, V.A., Puchyn, E.A et al. (2007). *Osnovy nadezhnomy mashyn. Chast 1*. Moscow : Yzd-vo. [in Russ.]
13. Kravchenko, Y.N., Zoryn, V.A., Puchyn, E.A et al. (2007). *Osnovy nadezhnomy mashyn. Chast 2*. Moscow : Yzd-vo. [in Russ.]
14. Kulyk, N.S., Kucher, A.H., & Myltsov, V.E. (2009). Matematycheskye modely nakopleniya povrezhdeniy y treshchynostoikosty pry deistviy statycheskykh y tsyklycheskykh nahruzok. *Visnyk NAU*, 3, 3-23. [in Russ.]
15. Mykhlyn, V.M. (1984). *Upravlenye nadezhnostiu sel'skokhoziaistvennoi tekhniky*. Moscow : Kolos. [in Russ.]
16. Svetlytskyi, V.A. (2004). *Statystycheskaia mekhanika y teoryia nadezhnomy*. Moscow : Yzd-vo MHTU ym. N.Э. Bauman. [in Russ.]
17. Stepnov, M.N. (2004). Novyi podkhod k raschetu koeffitsyenta zapasa prochnomy pry tsyklycheskom nahruzheniy. *Vestnyk mashynostroeniya*, 11, 14-17. [in Russ.]
18. Chernysh, O.M. (2012). Vyznachenniia zapasu mitsnosti dlia vuhletsevykh stalei pry tsyklichnomu navantazhenni. *Zb. nauk. prats Tavriiskoho derzhavn. ahrotekhnichnoho un.-tu*, 12(p. 1), 185-191. [in Ukr.]
19. Chernysh, O.N. (2013). *Otsenka ustalostnoi prochnomy rabochykh elementov sel'skokhoziaistvennykh mashyn. Zemes ukio inžinerija / Mokslo Darbai* 45(3). Aleksanras stulginskis university. Kauno r., Lithuania. 2013. *Mokslo Darbai* 45(2). pp. 51-58. [in Russ.]
20. Iaremenko, V.V., & Chernysh, O.M. (2013). Nadiinist hidravlichnykh pryvodiv zernozbyralnykh kombainiv. *Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvytku ta vyprobuvanniia novoi tekhniky i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy*, 17 (31), 332-347. [in Ukr.]

Received: January 09, 2018

Revision: January 29, 2018 Accepted: May 20, 2018