

**IV. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛОБРОБКА**

УДК 519.857:621.929.7:631.3

**МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ
ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН**

Веселовська Наталія Ростиславівна, д.т.н., професор,
Вінницький національний аграрний університет
Шаргородський Сергій Анатолійович, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет

N. Weselovska – Doctor of Technical Science, Professor
S. Shargorodskiy – PhD, Associate Professor,
Vinnytsia National Agrarian University

Використання нових енергоощадних технологій призвело до значного розвитку конструкцій вібраційних машин та широкого їх використання. У процесі їх експлуатації досить гостро постає питання ефективності і надійності використання даного виду машин пов'язані з наявністю і можливістю використання резервів її експлуатації.

Для забезпечення виконання свого службового призначення машини даного типу мають відповідати вимогам якості і надійності. Завдяки особливостям конструкції, та складності процесів що відбуваються під час їх роботи аналітичні розрахунки довговічності і надійності у класичному варіанті носять досить наближений характер і не забезпечують необхідної точності.

Отже питання надійності і довговічності вібраційного обладнання є актуальним.

Питанням оцінки надійності вібраційних машин займалися такі вчені: Іскович-Лотоцький Р.Д., Обертюх Р.Р., Севастьянов І.В., Канарчук В.С., Джарратано Д.Ж. та ін. Запропоновані ними методики практично не відрізняються від прийнятих у загальному машинобудуванні.

У публікації запропоновано методика оцінки ефективності і надійності, яка базується на використанні кількісних характеристик ймовірно-статистичного характеру. Такими показниками для кількісної оцінки безвідмовності та надійності є: вірогідність відсутності відмов, частота відмов, інтенсивність відмов, напрацювання на відмову. Дані показники є одними із найважливіших при проведенні технічного діагностування роботи вібраційних машин та оцінки їх залишкового ресурсу. Наведені основні розрахункові, залежності, проведено аналіз законів розподілу випадкових величин, які впливають на величину зазначених вище коефіцієнтів.

Ключові слова: вібраційна машина, гідроімпульсний привід, математичне сподівання, середньоквадратичне відхилення, надійність, напрацювання на відмову.

Рис.1. Літ. 8.

1. Вступ

Проблема підвищення надійності і ефективності функціонування вібраційних машин є важливим техніко-економічним показником роботи системи, рішення якої відкриває напрям для науково-обґрунтованого призначення показників надійності, досягнення цих показників оптимальним з економічної точки зору способом. Підвищення надійності і довговічності роботи вібраційних машин мають серйозний резерв для економії коштів, матеріалів, енергії і трудових ресурсів. Значною мірою надійність і довговічність вібраційної машини залежать від дії екстремальних перевантажень. Кваліфікаційний вибір матеріалів і коректний розрахунок з урахуванням наявності апріорної статистичної інформації про навантаження на стадії проектування є основними джерелами підвищення надійності без значного дорожчання машини. Тому на сьогоднішній день дана тема дослідження є актуальною.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблем

Відомі опубліковані монографії, підручники і періодичні джерела з досліджуваної тематики. У підручнику [1,2], розкрито питання забезпечення надійності машин на етапах проектування і експлуатації. Тут розглянутий взаємопов'язаний комплекс завдань: тертя, старі зношування. Розкриті причини зміни технічного стану машин і фізики їх відмов. У монографії [5] представлений підхід оцінки надійності ефективності забезпечення умов безаварійності автоматизованого технологічного процесу.



Існують як фундаментальні і періодичні джерела, де опубліковані результати роботи вібропресового устаткування [3,4]. Проте, фактично відсутні публікації за оцінками ефективності і надійності функціонування вібраційних машин. У зв'язку з цим тема статті досить актуальна.

Мета публікації: Запропонувати і розробити систему оцінок ефективності і надійності кількісних характеристик, які мають ймовірно-статистичний характер.

3. Основні результати дослідження:

Проблема підвищення надійності і ефективності машин та конструкцій є важливим техніко-економічним завданням, вирішення якого відкриває шляхи для науково-обґрунтованого призначення показників надійності, досягнення цих показників оптимальним з економічної точки зору способом. Підвищення надійності і довговічності машин представляє серйозний резерв для економії засобів, матеріалів, енергії і трудових витрат. В значній мірі надійність і довговічність машин залежать від діючих навантажень і дій. Правильний вибір матеріалів і корективний розрахунок з урахуванням апріорної статистичної інформації про навантаження на стадії проектування є основними джерелами підвищення надійності без значного дорожчання машини.

Проблема ефективності та надійності використання вібраційних машин пов'язана з наявністю і можливістю використання резервів експлуатації машини.

Тому для оцінки ефективності та надійності необхідно ввести кількісні характеристики, що мають ймовірнісний характер. Так як вони можуть бути визначені не тільки експериментальним шляхом, але і теоретичним аналізом, де доцільно їх розглядати зі статистичної та ймовірної точок зору.

В якості кількісних характеристик безвідмовності використаємо ймовірність відсутності відмови, частоту відмов, інтенсивність відмов, напрацювання на відмову.

Ці питання достатньо важливі у напрямку підвищення ефективності технічного діагностування роботи вібраційних машин [1].

Ймовірністю відсутності відмови $P(t)$ назвемо ймовірність того, що в певних умовах експлуатації в межах заданої протяжності роботи відмова не виникає, а ймовірність відмови $Q(t)$ це ймовірність, що у цих же умовах впродовж заданого часу відмова виникне. Стан справності (відсутність відмови) та несправності (наявність відмови) системи є несумісними та протилежними подіями. Сума ймовірностей таких подій, як відомо з теорії ймовірностей, дорівнює одиниці. Тобто, ймовірність відсутності відмови та ймовірність відмови пов'язані між собою залежністю:

$$P(t) + Q(t) = 1 \quad (1)$$

згідно визначення

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= R(T \geq t); \\ Q(t) &= R(T \leq t); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де R – символ ймовірності довільної події;

T – час роботи системи до відмови

t – час роботи системи, для якої визначаємо надійність

По визначенню теорії ймовірностей [1] функцією розподілення ймовірностей $F(x)$ випадкової величини ξ назвемо ймовірність того, що величина ξ прийме значення менше, чим деяка величина x , тобто

$$F(x) = R(\xi < x) \quad (3)$$

Звідси випливає, що функція ймовірності відмови $Q(t)$ аналогічна функції розподілення часу роботи системи до відмови.

При статистичній оцінці емпірична ймовірність відсутності відмови визначимо як відношення:

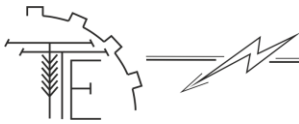
$$P_e(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_B} = \frac{N_0}{N_0} - \frac{n(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad (4)$$

а емпірична ймовірність відмови як відношення

$$Q_e(t) = n(t) / N_0 \quad (5)$$

де N_0 – кількість вузлів гідроімпульсного привода,

$n(t)$ – кількість вузлів гідроімпульсного привода, що відмовили за час t .



Отриманні статистичним методом значення емпіричних ймовірностей відсутності відмови та відмови завжди відрізняються від теоретичних [2]. Зі збільшенням кількості випробуваних вузлів $P_e(t)$ та $Q_e(t)$ вони асотатично наближаються до $P(t)$ та $Q(t)$. Теж саме можна сказати і про інші кількісні характеристики надійності. Початкові умови функцій $P(t)$ та $Q(t)$ визначимо таким чином, що при $t=0$ гідроімпульсний привід зберігає свої вихідні характеристики та задовільняє пред'явленим до нього вимог, тобто:

$$P(0) = 1; Q(0) = 0. \quad (6)$$

Як будь-яка безперервна функція, ймовірність відмови $Q(t)$ можна диференціювати при усіх значеннях аргумента. В теорії ймовірностей похідна функції розподілення носить назву щільності розподілення:

$$f(x) = dF(x) / dx, \quad (7)$$

де $f(x)$ - щільність розподілення ймовірностей випадкової величини ξ .

У теорії надійності цю щільність розподілення часу роботи системи до відмови називають частотою відмов $a(t)$ [2]. Проведемо такі перетворення:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (8)$$

Продиференціюємо ліву і праву частину (8) отримаємо:

$$dQ(t) / dt = a(t) = \frac{d}{dt} [1 - P(t)] = -dP(t) / dt. \quad (9)$$

Проінтегрувавши ліву та праву частину (9) отримаємо:

$$Q(t) = \int_0^t a(t) dt \quad (10)$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t a(t) dt. \quad (11)$$

По статистичному визначенню частота відмов є відношенням кількості вузлів, що відмовили в одиницю часу до кількості усіх вузлів, що випробовуються, при умові, що вони не відновлюються та не замінюються справними

$$a_e(t) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t, \quad (12)$$

Тут $n(\Delta t)$ - кількість вузлів, що відмовили на інтервалі часу Δt .

Типова крива залежності частоти відмов від часу показана на рис. 1.

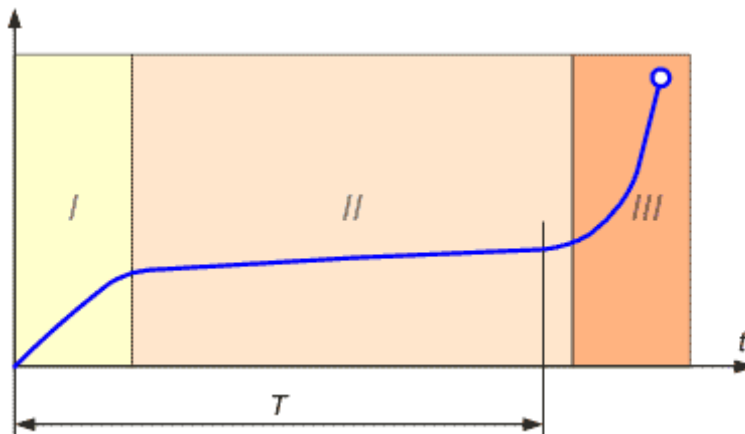
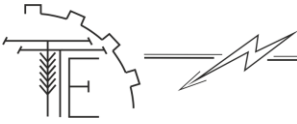


Рис.1. Типова залежність частоти відмов a від часу t .

На кривій виділенні три проміжки. Проміжок 1 обумовлений великою кількістю відмов на початку експлуатації гідроімпульсного приводу по причині грубих дефектів його елементів, похибок обслуговуючого персоналу. Початковий період різний для різних гідроімпульсних приводів. Його можна скоротити, або зовсім усунути, використовуючи методи тренувань та випробувань.

Проміжок випадкових відмов 2 характеризує нормальну роботу гідравлічного приводу. Відмови у цей проміжок мають в основному несподіваний характер, середня частота їх знижується.



Проміжок старіння визивається зносом гідроімпульсного приводу, коли внаслідок старіння елементів (вузлів) поступово зростає частота відмов.

Якщо частота відмов дозволяє оцінити надійність гідроімпульсного приводу за потрібний проміжок часу без врахування часу попередньої роботи, то інтенсивність відмов $\lambda(t)$ враховує цей вплив. Щільність розподілення, яка враховує попередній стан випадкової величини, назовем умовною щільністю. Таким чином інтенсивність відмов є умовною щільністю розподілення часу відмови, що представляє миттєву частоту відмов системи у момент часу t при умові відсутності відмов до цього моменту.

Статистично будемо її визначати як відношення кількості вузлів гідроімпульсного приводу, що відмовили в одиницю часу, до середньої кількості вузлів які працювали справно в даний відрізок часу, при умові, що вузли, що відмовили не відновлюються та не замінюються справними

$$\lambda_e(t) = n(\Delta t) / N_{\text{сеп}} \Delta t, \quad (13)$$

де $N_{\text{сеп}} = (N_i + N_{i+1}) / 2 = N_0 - n(\Delta t)$ - середня кількість справних вузлів на початку та кінці інтервалу часу Δt .

Ймовірносне представлення інтенсивності отримаємо, використовуючи основні теореми теорії ймовірностей [1]. Запропонований підхід є новим, який має свої елементи новизни зв'язку теорії надійності з теорією ймовірностей та математичною статистикою.

З виразу (13) замінимо $n(\Delta t)$ його значенням, отриманим з формули (12), а $N_{\text{сеп}}$ - його значенням з виразу (4) отримаємо:

$$\lambda(t) = a(t) / P(t) = -\frac{dp(t)}{dt} / P(t). \quad (14)$$

У відповідності з цим, кінцево визначимо ще одним способом $P(t)$, $Q(t)$, $a(t)$:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right), \quad (15)$$

$$Q(t) = (1 - \exp(-\lambda(t)dt)), \quad (16)$$

$$a(t) = \lambda(t) \exp(-\int \lambda(t) dt). \quad (17)$$

Отриманні вирази (15), (16), (17) устанавлюють залежність між ймовірністю відсутності відмови, ймовірністю відмови та частотою через інтенсивність відмов вузлів гідроімпульсного приводу.

Кінцевим результатом цього підходу визначення показників математичного сподівання T , дисперсії $D(t)$, середньоквадратичного відхилення $\sigma(t)$ як складові теорії ймовірності [1]. Використання частоти відмови інтенсивності відмов $\lambda(t)$, ймовірності відмов $P(t)$, ймовірності наявності відмов $Q(t)$ як складових теорії надійності [2]. Запропонований підхід аналізу, знайде своє місце у навчальному процесі.

Визначимо показник математичного сподівання T . З точки зору теорії ймовірності – це математичне сподівання середнього значення точкової оцінки t_i середній час, як середній час роботи i -го вузла. Тут показники – це надійнісні характеристики обчислені за допомогою інструментарію математичного апарату теорії ймовірності та математичної статистики.

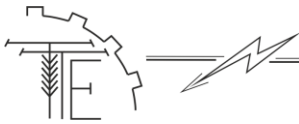
Таким чином, середнім часом відсутності відмови T назовем математичне сподівання часу роботи відповідного вузла гідроімпульсного приводу до відмови.

В теорії ймовірності математичним сподіванням випадкової величини ξ , якщо ця величина безперервна називають інтеграл виду $\int xf(x)dx$.

Перейшовши до теорії надійності, можна записати:

$$T = \int_{-\infty}^{+\infty} ta(t)dt. \quad (18)$$

Підставивши у вираз (18) значення $a(t)$ з (17), інтегруючи по частинам та врахувавши, що $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$, а час не може бути від'ємним, отримаємо:



$$T = \int_{-\infty}^{+\infty} tP'(t)dt = -tP(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} dt = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (19)$$

Враховуючи формули (17) отримаємо:

$$T = \int_0^{\infty} \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)dt\right) dt \quad (20)$$

Вираз (19) показує, що середній час відсутності відмови T повністю визначається ймовірністю відсутності відмови $P(t)$ і представляє собою площу, що обмежує криву $P(t)$ та осями координат.

Для визначення середнього часу відсутності відмови зі статичних емпіричних даних, використаємо формулу малої вибірки виду:

$$T_e = \sum_{i=1}^N t_i / N_0, \quad (20)$$

де t_i – час роботи i – го вузла гідроімпульсного привода до виникнення відмови.

Ця кількісна характеристика важлива, так як дозволяє у деяких випадках наглядно судити про надійність вузлів гідроімпульсного привода.

При оцінці надійності за допомогою середнього часу відсутності відмови необхідно знати дисперсію часу виникнення відмови $D(t)$, що характеризує розбіжність досліджуваної величини. Визначимо її як математичне сподівання квадрата відхилення випадкової величини t від математичного сподівання цієї випадкової величини (T):

$$D(t) = \int_0^{\infty} (t - T)^2 a(t)dt. \quad (21)$$

Причому зауважимо, що $D(t)$ необхідно мінімізувати. Це напрямком у подальших дослідженнях ми будемо розвивати. Наприклад, у класичних джерелах, описують щоб $D(t)=1$.

На рівні дисперсії $D(t)$ важливе значення має середньоквадратичне відхилення часу відсутності відмови. Середньоквадратичне відхилення $\sigma(t)$ дорівнює:

$$\sigma(t) = \sqrt{D(t)}. \quad (22)$$

Достатньо повно та просто визначати усі кількісні характеристики надійності із закону розподілення часу роботи вузлів до відмови. Час є випадковою безперервною величиною, тому у якості теоретичних законів розподілення можна використати довільні безперервні розподілення, що використовуються у теорії ймовірності.

4.Висновок

Проведена оцінка ефективності і надійності функціонування гідроімпульсних приводів. Для оцінки ефективності і надійності введена кількісна характеристика, які мають імовірнісний характер. Оскільки вони можуть бути визначені не лише експериментальним шляхом, але і теоретичним аналізом, де вони розглянуті із статистичної і імовірнісної точок зору.

Список використаних джерел

1. Шаров С. В., Лубко Д. В., Осадчий В. В. Интеллектуальные информационные системы: навч. посіб. Мелітополь: Вид-во МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2015. 144 с.
2. Надійність сільськогосподарської техніки / Черновол М. І., Чиркун В. Ю., Аулін В. В. та ін. ; за заг. ред. М. І. Черновола. Кіровоград: КОД, 2010. 320 с.
3. Zhu Z. Q., Lee B., Huang L., Chu W. "Contribution of current harmonics to average torque and torque ripple in switched reluctance machines," *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017. Vol. 53, №. 3, P. 1–9.
4. Іскович-Лотоцький Р. Д., Зелінська О. В., Іванчук Я. В. Технологія моделювання оцінки параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2018. 152 с. ISBN 978-966-641-723-0.
5. Iskovych-Lototsky R. D., Zelinska O. V., Ivanchuk Y. V., Veselovska N. R. Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials. *Eastern-*



European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems. 2017. Vol. 1, № 1(85). P. 9–17.

6. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Калетник Г. Н., Куценко А. Г. Использование прямого метода граничных элементов при исследовании стационарных колебаний пластин. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2017. №1(84). С. 8–14.
7. Руткевич В. С. Адаптивний гідравлічний привод блочно-порційного відокремлювача консервованого корму. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2017. №4(99). С. 108–133
8. Іванов М. І., Переяславський О. М., Шаргородський С. А., Ковальова І. М. Параметричне збудження пульсацій під час роботи регульованого аксіального роторнопоршневого насоса. *Гідроаеромеханіка в інженерній практиці 2017 рік* : матеріали XXII міжнародної наук.-технічної конф., 23-26 трав. 2017 р. Черкаси, 2017. С. 151–152.

References

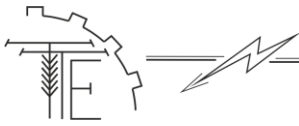
- [1] Sharov, S. V., Lubko, D. V., Osadchyi, V. V. (2015). *Intelektualni informatsiini systemy: navch. posib. [Intelligent information systems: a textbook]*, Melitopol: Vyd-vo MDPU im. B. Khmelnytskoho. [in Ukrainian].
- [2] Chernovol, M. I. (Ed.). (2010). *Nadiinist silskohospodarskoi tekhniki [Reliability of agricultural machinery]*, Kirovohrad: KOD, [in Ukrainian].
- [3] Zhu, Z. Q., Lee, B., Huang, L., Chu, W. (2017). Contribution of current harmonics to average torque and torque ripple in switched reluctance machines, *IEEE Transactions on Magnetics*, 3, 1–9. [in English].
- [4] Iskovych-Lototskyi, R. D., Zelinska, O. V., Ivanchuk, Ya. V. (2018). *Tekhnolohiia modeliuвання otsinky parametriv formoutvorennia zahotovok z poroshkovykh materialiv na vibropresovomu obladnanni z hidroimpulsnym pryvodom [Technology of modeling of estimation of parameters of forming of billets from powder materials on the vibropress equipment with the hydropulse drive]*. Vinnytsia : VNTU. [In Ukrainian].
- [5] Iskovych-Lototsky, R. D., Zelinska, O. V., Ivanchuk, Y. V., Veselovska, N. R. (2017). Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*,(1), 1(85), 9–17. [in English].
- [6] Adamchuk, V. V., Bulhakov, V. M., Kaletnyk, H. N., Kutsenko, A. H. (2017). Yspolzovanye priamoho metoda hranychnikh elementov pri issledovanii statsyonarnikh kolebanyi plastin [The use of the direct method of boundary elements in the study of stationary oscillations of the plates]. *Vibratsii v tekhnitsii ta tekhnolohiiakh*, 1(84), 8-14. [In Russian].
- [7] Rutkevych, V. S. (2017). Adaptivnyi hidravlichnyi pryvod blochno-porshynoho vidokremliuvacha konservovanoho kormu [Adaptive hydraulic actuator of block-portion separator of canned food]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 4(99), 108–133. [In Ukrainian].
- [8] Ivanov, M. I., Pereiaslavskiy, O. M., Sharhorodskiy, S. A., Kovalova, I. M. (2017). Parametrychne zbudzhennia pulsatsii pid chas roboty rehulovanoho aksialnoho rotornoporshnevoho nasosa [Parametric excitation of pulsations during operation of an adjustable axial rotary piston pump]. *Hidroaeromekhanika v inzhenernii praktitsii* : Materialy XXII mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii (pp. 151-152). Cherkasy. [In Ukrainian].

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Веселовська Наталія Ростиславівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва, Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: wnatalia@ukr.net)

Шаргородський Сергій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва, Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: sergey20@vsau.vin.ua).

Веселовская Наталья Ростиславовна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры машин и оборудования сельскохозяйственного производства, Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: wnatalia@ukr.net).



Шаргородский Сергей Анатолойович – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования сельскохозяйственного производства, Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: sergey20@vsau.vin.ua).

Weselovska Nataliya – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna str., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net).

Shargorodskiy Sergey – PhD, Associate Professor of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna str., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: sergey20@vsau.vin.ua).