



УДК 621.8

FOUNDATIONS OF TECHNOLOGICAL SAFETY OF COMPLEX TECHNICAL AGRICULTURAL SYSTEMS

ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ СИСТЕМ

Tolstenko A.V. / Толстенко О.В.*s.t.s., as. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0003-4752-5704

*Dnipro State Agrarian and Economic University,**Dnipro, Efremova, 25, 49600**Дніпровський державний аграрно-економічний університет,**Дніпро, Єфремова, 25, 49600*

Анотація. В роботі розглядається метод розрахунку терміну служби в'язко-пружних елементів і включає такі ефекти, як старіння. Зазначені ефекти, і передусім старіння, необхідні, оскільки впливають на механізм руйнування еластомерних конструкцій. Приведений алгоритм розрахунку придатний для прогнозування довговічності елементів, у яких старіння відіграє переважну роль, а відмова не передбачає порушення цілісності геометричної форми.

Ключові слова: в'язко-пружні матеріали, циклічне навантаження, механізм руйнування.

Вступ.

Створення методів підвищення безпеки ресурсолімітуючих елементів складних технічних сільськогосподарських систем в умовах інтенсифікації виробництва є важливими і актуальними [1,2,3,4].

Є досвід по вібро- і сейсмоізоляції машин і будівель шляхом застосування металевих, гумовометалевих, гідравлічних і комбінованих елементів [1,2].

Відсутність аналітичних методів оцінки параметрів сейсмоізоляторів і складність конструкції ізолюючих опор, висока трудомісткість виготовлення стримують їх широке застосування [3].

Основний текст.

Критерії віробезпечності складних технічних сільськогосподарських систем повинні включати два аспекти:

- ефективність віброзахисту;
- довговічність об'єкта.



Ефективність віброзахисту

$$\omega_{\text{соб}} \leq \omega_{\text{кр}}, \quad \omega_{\text{кр}} = \omega_n / k, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт, який визначає ефективність віброізоляції.

Другий аспект критерію віробезпечності пов'язаний з старінням гуми.

Критерій структурної стійкості гумової деталі

$$G_0(p) = \frac{N^* \varepsilon_0^2 \psi(p)}{2k_1 T p_{\text{кр}}} \leq G_{\text{кр}}. \quad (2)$$

Критерій віробезпеки при дії тривалих циклічних навантажень

$$\begin{cases} \omega_{\text{соб}} \leq \omega_{\text{кр}}, \\ G_0(p) = \frac{N^* \varepsilon_0^2 \psi(p)}{2k_1 T p_{\text{кр}}} \leq G_{\text{кр}}, \end{cases} \quad (3)$$

де $\omega_{\text{кр}} = \omega_n / k$ – коефіцієнт, який визначає ефективність віброізоляції;

$$G_{\text{кр}} = (1,6 \div 1,8) G_{\text{нач}};$$

$$G_0(p) = G_{\text{нач}} \left[n + \frac{(1-n)(1-p)(n+3/2)}{(n+3/2) + p(1-n)} \right].$$

Критерій віробезпеки (3), дозволяє визначити частоту власних коливань, несучу здатність, параметри матеріалу.

Процедура прогнозування довговічності гумометалевої системи передбачає рішення рівнянь.

Розглянемо ці рівняння:

1) рівняння рівноваги

$$\nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{1-2\nu} \text{grad div } \vec{u} = 0; \quad (4)$$

де ∇^2 – оператор Лапласа;

$\vec{u}$ – вектор переміщень;

ν – коефіцієнт Пуассона;

Граничні умови

1. u_r, u_z – радіальне і осьове переміщення відповідно, напруги τ_{rz} ,



2. $\tau_z = 0$ – на бічній поверхні віброізолятора;

2) рівняння теплопровідності

$$k \operatorname{div} \operatorname{grad} T + D' = 0, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності;

D' – усереднена за цикл дисипативна функція, яка визначається виразом:

$$D' = \frac{\omega}{2\pi} \left[2G'' \left(|\varepsilon_z|^2 + |\varepsilon_\varphi|^2 + |\varepsilon_r|^2 + 2|\varepsilon_{rz}|^2 + \frac{(3K'' - 2G'')}{3|\varepsilon_z + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_r|^2} \right) \right], \quad (6)$$

$\varepsilon_z, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_r, \varepsilon_{rz}$ – компоненти тензора деформацій, що обчислюються через переміщення u_r, u_z за формулами теорії пружності;

$$G'' = \frac{G_q \psi}{2\pi}; \quad 3K'' = \frac{2G''(1+\nu)}{1-2\nu},$$

G'' – динамічний модуль пружності;

ψ – коефіцієнт дисипації енергії.

Граничні умови в припущенні конвективного теплообміну з навколишнім середовищем, що відбувається на поверхні віброізолятора, мають вигляд:

$$\begin{aligned} k \operatorname{grad} T n &= \alpha_1 (T - T_0) - \text{бічна поверхня;} \\ k \operatorname{grad} T n &= \alpha_2 (T - T_0) - \text{опорна поверхня;} \\ T &= T_0 - \text{в початковий момент часу;} \end{aligned} \quad (7)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища.

3) рівняння довговічності

$$\int_0^{t^*} \dot{U}_\rho dt = \int_0^{t^*} (\tau_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{q} + \dot{\chi}) dt, \quad (8)$$

де $\dot{U}_\rho$ – частина внутрішньої енергії, яка витрачається на руйнування;

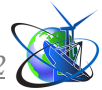
$\tau_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}$ – енергія дисипації в матеріалі при його деформуванні;

$\dot{q}$ – теплова енергія;

$\dot{\chi}$ – енергія немеханічного впливу;

t^* – час локального руйнування.

У розглянутій схемі розрахунку використовується енергетичний критерій руйнування, як найбільш перспективний.



Для опису термомеханічної поведінки досліджуваних віброізоляторів доцільно прийняти критеріальне рівняння у вигляді

$$t^* = \Delta U_o^* / D, \quad (9)$$

де ΔU_o^* – критичне значення енергії;

t^* – час руйнування, визначеного значенням D' згідно (6).

Були прийняті також наступні положення:

- ✓ матеріал віброізоляторів лінійно-в'язкопружний;
- ✓ напружено-деформований стан квазістатичний, всі компоненти змінюються за гармонійним законом;
- ✓ коефіцієнт Пуассона - постійна величина.

Аналітично:

$$\int_0^{t^*} \dot{U}_p dt = \int_0^{t^*} (\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} dt + \dot{\chi} - \dot{q}) dt; \quad (10)$$

$$\int_0^{t^*} \dot{U}_p dt = \Delta U_p^*;$$

$$N^* = \frac{\Delta U_p^*}{0,5 |E^*| \varepsilon^2 \psi (1 - \eta_T) f(x, y, z)}, \quad (11)$$

де $t^* = \frac{2\pi}{\omega} N^*$ – час до руйнування віброізолятора;

N^* – кількість циклів до руйнування віброізолятора;

$|E^*|$ – абсолютне значення модуля пружності;

ε – відносна деформація віброізолятора;

ΔU_p^* – значення щільності енергії, що йде на руйнування гуми;

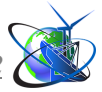
ψ – коефіцієнт дисипації енергії;

η_T – коефіцієнт, частини енергії яка витрачається на теплоутворення;

$f(x, y, z)$ – функція розподілу полів напружень і деформацій в віброізоляторі;

$\dot{q}$ – тепловий потік;

χ – енергія зовнішнього теплового поля.



Критеріальне рівняння (11) можна записати в більш спрощеному вигляді

$$N^* = \frac{\Delta U_p^*}{0,5|E^*|\varepsilon^2\psi\eta_p}, \quad (12)$$

де $\eta_p = 1 - \eta_T$ – коефіцієнт, що характеризує частину енергії, що йде на руйнування структури гуми, для гуми 2959 $\eta_p = 0,52$ [1].

Або з врахуванням

$$\eta_p = \frac{\Delta U_p^*}{\Delta U_g^*} \quad (13)$$

отримуємо

$$N^* = \frac{\Delta U_g^*}{0,5|E^*|\varepsilon^2\psi}, \quad (14)$$

де ΔU_g^* – критичне (допустиме) значення щільності енергії, дисипіруемой в віброізоляторах при навантаженні.

Якщо параметри гуми $|E^*|$ і ψ залежать від часу навантаження віброізолятора або від його пошкодженості, то вираз (14) можна записати у вигляді

$$N^* = \frac{\Delta U_g^*}{0,5|E^*(t)|\varepsilon^2\psi(t)} \quad (15)$$

або

$$\frac{\varepsilon^2}{2} \cdot \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{t^*} |E^*(t)|\psi(t) dt = \Delta U_g^*. \quad (16)$$

Слід зазначити, що час до локального руйнування віброізолятора t^* пов'язан з руйнуванням центральної області гумового масиву.

З урахуванням рівнянь (15) і (16) для динамічного модуля пружності $E_g(t)$ і коефіцієнта дисипації енергії $\psi(t)$ (16) отримаємо у вигляді



$$E_{g\kappa} \psi_{\kappa} t^* - \frac{E_{g\kappa} k_E \psi}{2} t^{*2} + \frac{k_{\psi} (E_{g\kappa} - E_{g\eta})}{k_E^2} \cdot [\exp(-k_E t^*) (k_E t^* + 1) - 1] +$$

$$+ \frac{\psi_{\kappa} (E_{g\kappa} - E_{g\eta})}{k_E^2} [\exp(-k_E t^*) - 1] = \frac{4\pi}{\varepsilon^2 \omega} \Delta U_g^*. \quad (17)$$

Нехтуючи останніми членами рівняння (17) за їхню малість, отримуємо

$$E_{g\kappa} \psi_{\kappa} t^* - \frac{E_{g\kappa} k_E \psi}{2} t^{*2} = \frac{4\pi}{\varepsilon^2 \omega} \Delta U_g^*. \quad (18)$$

Експериментальні дані і аналіз рівняння (18) показують, що основний внесок в довговічність віброізолятора вносить зміна коефіцієнта дисипації енергії. Тому прогнозування довговічності можна проводити за формулою

$$\Delta U_p^* = \frac{\eta_p \varepsilon^2 E_{g\kappa} (N^*)}{2} (\psi_0 N^* - k_{\psi} N^{*2}). \quad (19)$$

Висновки.

1. Були розглянуті методологія аналізу і методи підвищення експлуатаційної надійності складних технічних сільськогосподарських систем.
2. Були отримані результати технологічної безпеки складних технічних сільськогосподарських систем які можуть використовуватися при розробці систем захисту.

Література:

1. Дірда В.І. Землеробська механіка/О.С. Кобець, В.І. Дірда, С.М. Гребенюк, С.П. Сокіл, А.М. Пугач.- Дніпро: «Журфонд», 2020.- 564 с.
2. Dyrda V.I. Dynamics of heavy vibrating machines taking in account instability in time of their parameters /V.I. Dyrda, M.I. Lysytsia, V.A. Lapin, H.M. Axalcov, Y.V. Kalhankov, O. V. Tolstenko, O. A. Chernii // NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.- 2020.-v.6.- p.68-74
3. Дірда В.І. Гумові футерівки рудоподріблювальних млинів в екстремальних умовах / В.І. Дірда, Р.П. Зозуля, Л.Г. Головка, О.В. Стойко, І.В. Хміль.- Дніпро: «Журфонд», 2018. – 276 с.
4. Толстенко О. В. Універсальний метод розрахунку гумометалевих деталей



при їх деформації / О. В. Толстенко // Наукові основи адаптивного землеробства : матеріали Міжнар. науко.-практ. конф. (м. Дніпро, 16-17 трав. 2024 р.). – Дніпро : ДДАЕУ, 2024. – С. 403-405.

Abstract. *The paper considers a method for calculating the service life of viscoelastic elements and includes such effects as aging. These effects, and primarily aging, are necessary because they affect the mechanism of failure of elastomeric structures. The calculation algorithm presented is suitable for predicting the durability of elements in which aging plays a predominant role, and failure does not involve a violation of the integrity of the geometric shape.*

Key words: *viscoelastic materials, cyclic loading, failure mechanism.*

Статтю відправлено: 20.06.2025 г.

© Толстенко О.В.