УДК [631.-192+621/43] : 662/75

МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ МОБІЛЬНОЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА РІЗНИХ ВИДАХ ПАЛИВО – МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Д. П. Журавель, к.т.н., Таврійський державний агротехнологічний університет

Робота присвячена розробці методології оцінки надійності мобільної сільськогосподарської техніки при експлуатації її на різних видах паливо – мастильних матеріалів

Ключові слова: *роботоздатність, надійність, паливо – мастильні матеріали, функціональні системи, ймовірність, функція готовності, середній ресурс.*

Постановка проблеми. Ефективність сільськогосподарського виробництва в значній мірі залежить від роботоздатності мобільної сільськогосподарської техніки, яка виконує одну із ключових функцій АПК України. Сучасна сільськогосподарська техніка являє собою складні енергонасичені комплекси, роботоздатність яких залежить від надійності її функціональних систем. Однією з основних тенденцій розвитку сучасної мобільної сільськогосподарської техніки є пошук альтернативних джерел енергії.

Адаптація сучасних функціональних систем до нових видів ПММ рослинного або тваринного походження є неодмінною умовою забезпечення надійності складної сільськогосподарської техніки. Це і є суть державної проблеми на етапі боротьби за енергетичну незалежність України.

Аналіз результатів останніх досліджень. Ефективність використання сільськогосподарської техніки, в першу чергу, залежить від її експлуатаційної надійності, яка підтримується системою технічного обслуговування і ремонту.

Основними показниками надійності елементів функціональних систем є ймовірність безвідмовної роботи P (t) і середній ресурс в мото - годинах.

Відповідно до ГОСТ 10579-82 (РЕВ 2405-80) середній ресурс повинен бути не менше середнього ресурсу до першого ремонту, в залежності від умов експлуатації [1,2].

Це відповідає ресурсу всіх елементів, більшість яких замінюються при частковому розбиранні в процесі технічного обслуговування.

Досвід експлуатації мобільної сільськогосподарської техніки на ПММ біологічного походження, свідчить про те, що наведені дані середніх ресурсів елементів її функціональних систем істотно відрізняються. Причому, в літературі наводяться досить суперечливі відомості [2-5].

Мета досліджень. Метою статті є встановлення показників надійності функціональних систем мобільної сільськогосподарської техніки, при роботі на різних видах паливо - мастильних матеріалах в залежності від умов експлуатації.

Результати досліджень. Мобільна техніка складається із комплексу складних функціональних систем, які поділяються на нерезервовані і резервовані відновлювальні системи.

Критеріями надійності нерезервованих відновлюваних систем є:

$K_Г(t)$ - функція готовності (ймовірність того, що система готова до роботи в довільний момент часу *t*).

$K_Г$ - функція готовності (фінальна ймовірність того, що система справна в довільний момент часу *t*).

T **–** напрацювання на відмову (середній час між відмовами).

T_B **–** середній час відновлення системи.

$\varpi(t)$ - параметр потоку відмов.

Між цими показниками існує залежність виду:

$$K_Г = \frac{T}{T+T_B}, \qquad K_Г = \lim_{t\to\infty} K_Г(t) \qquad (1)$$

Показники надійності відновлювальних і невідновлювальних систем пов'язані між собою інтегральним рівнянням:

$$\varpi(t) = f(t) = \int_0^t \varpi(\tau)\cdot f(t-\tau)d\tau\ , \qquad (2)$$

де $f(t)$ - щільність розподілу часу до відмови невідновлювальної системи.

Рішення інтегрального рівняння (3.2) не дозволяє в явному вигляді отримати залежність функції готовності від показників надійності системи: ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, напрацювання на відмову, середній час відновлення системи та інші.

Тому розглядають надійність відновлюваної системи, як одного елемента.

Нехай $f(t)$ - щільність розподілу часу до відмови, $P(t)$ - ймовірність безвідмовної системи, T - математичне очікування часу до відмови (напрацювання на відмову - середній час між відмовами), $g(t)$ - щільність розподілу часу відновлення системи, $T_в$ - математичне очікування часу відновлення (середній час відновлення системи). Складність розрахунку показників надійності полягає в обчисленні функції готовності $K_Г(t)$ - ймовірність того, що система готова до роботи в довільний момент часу t .

Функція готовності відповідає інтегральному рівнянню:

$$K_Г(t) = f * g * K_Г(t) + P(t)\ , \qquad (3)$$

Рішенням інтегрального рівняння (3.1) є функція:

$$K_\Gamma(t) = P(t) + \sum_{k=1}^{\infty} f^{*(k)} * g^{*(k)} * P(t) \qquad (4)$$

Згортка функції $f * g(t)$ для постійної інтенсивності розраховується за формулою:

$$f * g(t) = \int_0^{b(t)} f(t-x)\mu \cdot e^{-\mu x} dx\ , \qquad (5)$$

де $b(t) = \min(t, a) = \min\left(t; -\frac{1}{\mu}\ln\left(\frac{\varepsilon}{\mu}\right)\right)$, ε - точність обчислень. (6)

Функція $K_\Gamma(t)$ представлена в аналітичному вигляді, проте не дає можливості обчислень в інженерних розрахунках. Передбачені окремі випадки, що допускають чисельне і аналітичне рішення. Кожна і з функціональних систем підпорядковується певному закону розподілу ймовірностей та щільності розподілу до відмови елементів вузлів і агрегатів.

Основні закони розподілу ймовірностей наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Закони розподілу ймовірностей та щільності розподілу до відмови елементів функціональних систем

Розподіл	$f(t)$	$P(t)$
Експоненціальний	$\lambda \cdot e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$
Рівномірний	$\begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \le t \le b \\ 0, & t < a,\ t > b \end{cases}$	$\begin{cases} 1, & t < a \\ \frac{b-1}{b-a}, & a \le t \le b \\ 0, & t > b \end{cases}$
Гамма $\Gamma(\alpha, \beta)$	$\frac{t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$	$1 - \Gamma(\alpha, \frac{1}{\beta})$
Усічене нормальне $TN(m_0, \sigma_0)$, $m \ge 1{,}33\sigma$	$\frac{C}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_0)^2}{2\sigma_0^2}}$ $C = \frac{1}{0{,}5 + \Phi_0\left(\frac{m_0}{\sigma_0}\right)}$	$C = 0{,}5 - \Phi_0\left(\frac{t-m_0}{\sigma_0}\right)$
Релея $R(\lambda)$	$2\lambda t e^{-\lambda t^2}$	$e^{-\lambda t^2}$
Вейбулла $W(\alpha, \beta)$	$\frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} e^{-\left(\frac{1}{\beta}\right)^\varepsilon}$	$e^{-\left(\frac{1}{\beta}\right)^\varepsilon}$
Нормальне $N(m, \sigma), m > 3\sigma$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}$	$0{,}5 - \Phi_0\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)$

Функція готовності нерезервованої системи, що складається з елементів має загальний вигляд:

$$K_\Gamma(t) = \sum_{t_1=0}^{\infty}\sum_{t_2=0}^{\infty}\ldots\sum_{t_n=0}^{\infty}\left(f_1^{*(t_1)} * P_1 \cdot f_2^{*(t_2)} * P_2 \cdot \ldots f_n^{*(t_n)} * P_n\right) * g_1^{*(t_1)} * g_2^{*(t_2)} * \ldots * g_n^{*(t_n)} \qquad (7)$$

де $f_j(t)$ - щільність розподілу безвідмовної роботи;

$P_j(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи j - го елементу;

$g_j(t)$ - щільність розподілу часу відновлення j - го елементу, $j = 1, 2, \ldots, n$.

На підставі формули (5) отримані формули для практичного застосування, зокрема для випадків:

- час безвідмовної роботи j - го елементу, має нормальний розподіл ймовірностей з параметрами (T_j, σ_j), тоді:

$$f_j^*(t) * P_j^*(t) = \Phi_0\left(\frac{t - i_j T_j}{\sqrt{k}\sigma_j}\right) - \Phi_0\left(\frac{t - (i_j + 1)T_j}{\sqrt{k+1}\sigma_j}\right), \qquad (8)$$

відповідно коефіцієнт готовності системи дорівнює:

$$K_\Gamma(t)=\sum_{t_1=0}^{\infty}\sum_{t_2=0}^{\infty}\cdots\sum_{t_n=0}^{\infty}\prod_{j=1}^{n}\left(\Phi_0\left(\frac{t-i_jT_j-\sum_{k=1}^{n}i_k\cdot T_{Bi_k}}{\sqrt{t_j}\cdot\sigma_j}\right)-\Phi_0\left(\frac{t-(i_j+1)T_j-\sum_{k=1}^{n}i_k\cdot T_{Bi_k}}{\sqrt{t_j+1}\cdot\sigma_j}\right)\right) \quad (9)$$

Передбачається, що час відновлення елементів системи постійний $g_j(t)=\delta_{T_{Bj}}(t)$, [1], $\Phi_0(t)$ - функція Лапласа.

- час безвідмовної роботи *j* - го елементу, має гамма-розподіл ймовірностей з параметрами (α_j,β_j), тоді:

$$f_j^*(t)*P_j^*(t)=\Gamma\left(i_j\alpha_j,\frac{1}{\beta_j}\right)-\Gamma\left((i_j+1)\alpha_j,\frac{1}{\beta_j}\right) \quad (10)$$

відповідно коефіцієнт готовності системи дорівнює:

$$K_\Gamma(t)=\sum_{t_1=0}^{\infty}\sum_{t_2=0}^{\infty}\cdots\sum_{t_n=0}^{\infty}\prod_{j=1}^{n}\left(\Gamma\left(i_j\alpha_j,\frac{1-\sum_{k=1}^{n}i_k\cdot T_{Bi_k}}{\beta_j}\right)-\Gamma\left((i_j+1)\alpha_j,\frac{1-\sum_{k=1}^{n}i_k\cdot T_{Bi_k}}{\beta_j}\right)\right) \quad (11)$$

де $\Gamma(k,t)$ - неповна гамма – функція.

Істотним недоліком отриманих коефіцієнтів є відсутність спільності законів розподілу і використання для систем з числом елементів, що не перевищують кілька десятків. Функція готовності нерезервованої системи з великим числом елементів, підлеглих не експоненціальним законами розподілу часу до відмови, може бути отримано тільки наближено за формулою:

$$K_\Gamma(t)=\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{n}\frac{K_{ni}(t)}{K_{\Gamma i}(t)}} \quad (12)$$

де $K_{ni}(t)$ - функція простою, $K_{\Gamma i}(t)$ - функція готовності i - го элемента.

Методи розрахунку показників надійності резервованих відновлюваних систем, як правило є складними в інженерному застосуванні, що можна уникнути при деяких припущеннях, виділяючи системи в класи з простими алгоритмами для обчислення показників надійності. До них відносяться: спрощення структурної схеми розрахунку надійності; незалежність елементів по відмовах і відновленню; експоненціальні закони розподілу часу безвідмовної роботи і часу відновлення елементів; певні правила обслуговування відмовили елементів; стаціонарний характер показників надійності системи.

При оцінці надійності стаціонарних і нестаціонарних показників надійності відновлюваних систем найчастіше використовують методи одновимірних і багатовимірних марковських випадкових процесів. Значення показників надійності є наближеними і розраховуються наближеними методами.

Коефіцієнт готовності, напрацювання на відмову, середній час відновлення і середній час безвідмовної роботи обчислюються за формулами:

$$K_\Gamma(t)=\frac{1+\sum_{k=1}^{n-1}p_1\ldots p_k}{1+\sum_{k=1}^{n}p_1\ldots p_k},\qquad T=\frac{1+\sum_{k=1}^{n-1}p_1\ldots p_k}{\lambda_n p_1\ldots p_{n-1}},\qquad T_B=\frac{1}{\mu_n},$$

(13)

$$T_1=\sum_{k=1}^{n}\frac{1+\gamma_{k-1}+\gamma_{k-1}\gamma_{k-2}+\ldots+\gamma_{k-1}\ldots\gamma_1}{\lambda_k}$$

де $\rho_i=\frac{\lambda_i}{\mu_i}$, $\gamma_i=\frac{\mu_i}{\lambda_i}$, λ_i - інтенсивність переходів, відповідні відмови елементів системи; μ_i - інтенсивності переходів, відповідні відновленню елементів системи; $n+1$ - загальне число станів.

Математичною моделлю функціонування системи є система звичайних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} p_0'(t)=-\lambda_c p_0(t)-\sum_{i=1}^{n}\mu_i\cdot p_i(t) \\ p_i'(t)=\lambda_i p_0(t)-\mu_i\cdot p_i(t), \qquad i=1,2,..n \end{cases} \quad (14)$$

де λ_i - інтенсивність відмови *i*-го елементу, відповідні відмовам елементів системи; μ_i - інтенсивності відновлення *i*-го елементу, $\lambda_c=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i$ - інтенсивність відмови системи, $p_0(t)=K_\Gamma(t)$ - ймовірність того, що в момент *t* система справна, $p_i(t)$ - ймовірність того, що в момент *t* система знаходиться в несправному стані внаслідок відмови i -го елементу.

Систему (8) лінійних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами можливо вирішувати аналітично (для обмеженого числа елементів при фіксованому значенні інтенсивностей відмови і відновлення) і чисельним (набли-

женим, зокрема Рунге - Кутта).

Розглянемо функціональні системи вузлів і агрегатів мобільної техніки при роботі на різних видах паливо - мастильних матеріалів (рис.1).

Статистичний аналіз напрацювання функціональних систем мобільної техніки, що поступають в ремонт, дозволив встановити середні значення напрацювання до відмови та їх 80% ресурс, що відповідає нормованим середнім ресурсам, встановлених ГОСТ 10579-82 (СЭВ 2405-80).

В якості функціональних системи мобільної техніки взяті: дизельний двигун, трансмісія, ходова частина, гідрообладнання, електрообладнання, механізм управління. Відмови цих елементів статистично незалежні.

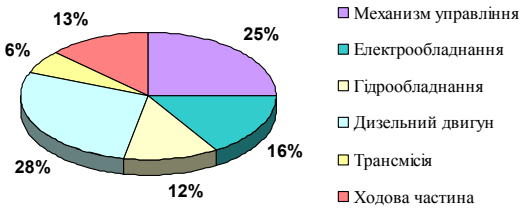


Рисунок 1 - Розподіл відмов по функціональним системах мобільної техніки

Опис основних вузлів і агрегатів функціональних систем мобільної техніки можна показати у вигляді граф станів (рис. 2): 0 – мобільна техніка; 1 –дизельний двигун; 2 – трансмісії; 3 - ходова частина; 4 – гідрообладнання; 5 – електрооообладнання; 6 - механізм управління.

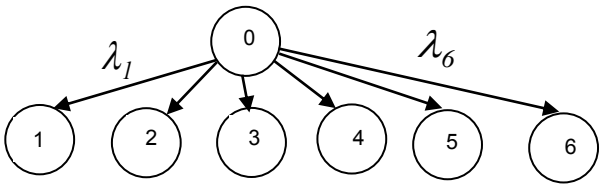


Рисунок 2 - Граф станів функціональних систем мобільної техніки

Система лінійних дифференціальних рівнянь сталими коефіцієнтами описує процесс функціонування систем мобільної техніки, яка має вид:

$$\begin{cases} p_0'(t) = -(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3+\lambda_4+\lambda_5+\lambda_6)p_0(t) + \\ \quad + \mu_1 p_1(t) + \mu_2 p_2(t) + \mu_3 p_3(t) + \mu_4 p_4(t) + \mu_5 p_5(t) + \mu_6 p_6(t) \\ p_1'(t) = \lambda_1 p_0(t) \\ p_2'(t) = \lambda_2 p_0(t) \\ p_3'(t) = \lambda_3 p_0(t) \\ p_4'(t) = \lambda_4 p_0(t) \\ p_5'(t) = \lambda_5 p_0(t) \\ p_6'(t) = \lambda_6 p_0(t) \\ p_0(t)+p_1(t)+p_2(t)+p_3(t)+p_4(t)+p_5(t)+p_6(t) = 1 \end{cases}$$

Вирішенням системи рівнянь є матриця ймовірностей безвідмовної роботи функціональних систем мобільної техніки при експлуатації:

- на мінеральних ПММ

u =	1	2	3	4	5	6	7
0	1	0	0	0	0	0	0
1	0.951	$8.066\cdot10^{-3}$	$5.042\cdot10^{-3}$	$6.427\cdot10^{-3}$	0.011	0.014	$8.066\cdot10^{-3}$
2	0.912	0.016	$9.855\cdot10^{-3}$	0.013	0.021	0.028	0.016
3	0.881	0.023	0.014	0.018	0.03	0.041	0.023
4	0.858	0.03	0.019	0.024	0.04	0.054	0.03
5	0.843	0.037	0.023	0.03	0.049	0.067	0.037
6	0.835	0.044	0.028	0.035	0.058	0.079	0.044
7	0.833	0.051	0.032	0.041	0.067	0.092	0.051
8	0.838	0.058	0.036	0.046	0.076	0.104	0.058
9	0.848	0.065	0.041	0.052	0.085	0.117	0.065
10	0.864	0.072	0.045	0.058	0.095	0.129	0.072

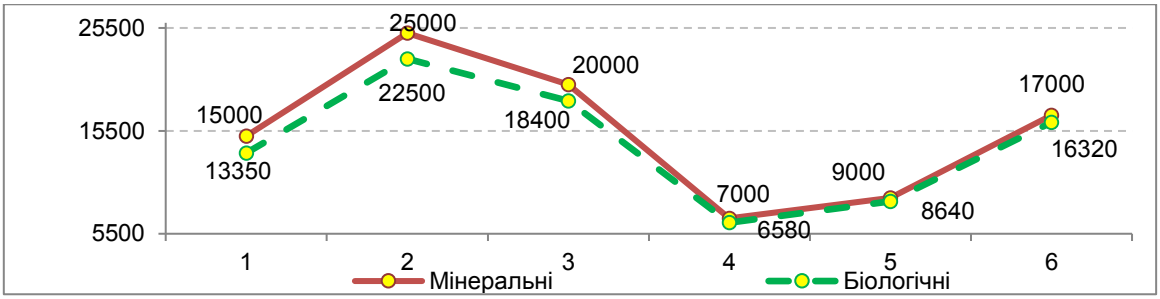
- на біологічних ПММ

u =	1	2	3	4	5	6	7
0	1	0	0	0	0	0	0
1	0.947	$9.044\cdot10^{-3}$	$5.59\cdot10^{-3}$	$6.972\cdot10^{-3}$	0.011	0.015	$9.044\cdot10^{-3}$
2	0.905	0.018	0.011	0.014	0.022	0.029	0.018
3	0.872	0.026	0.016	0.02	0.032	0.043	0.026
4	0.848	0.034	0.021	0.026	0.042	0.056	0.034
5	0.832	0.042	0.026	0.032	0.052	0.069	0.042
6	0.823	0.049	0.031	0.038	0.061	0.082	0.049
7	0.821	0.057	0.035	0.044	0.071	0.095	0.057
8	0.826	0.065	0.04	0.05	0.08	0.107	0.065
9	0.838	0.072	0.045	0.056	0.09	0.12	0.072
10	0.855	0.08	0.05	0.062	0.1	0.133	0.08

Таким чином, необхідно обчислити середні ресурси та ймовірності безвідмовної роботи функціональних систем мобільної техніки при роботі на мінеральних і біологічних ПММ.

Середні ресурси функціональних систем мобільної техніки при роботі на різних видах

ПММ наведені на рис.3.



1 - дизельний двигун, 2 – трансмісія, 3-ходова частина,
4 – гідрообладнання, 5 – електрообладнання, 6 - механізм управління)

Рисунок 3 - Середні ресурси функціональних систем мобільної техніки при роботі на різних видах ПММ

Ймовірності безвідмовної роботи функціональних систем мобільної техніки при роботі на мінеральних та біологічних ПММ наведені на рис.4.

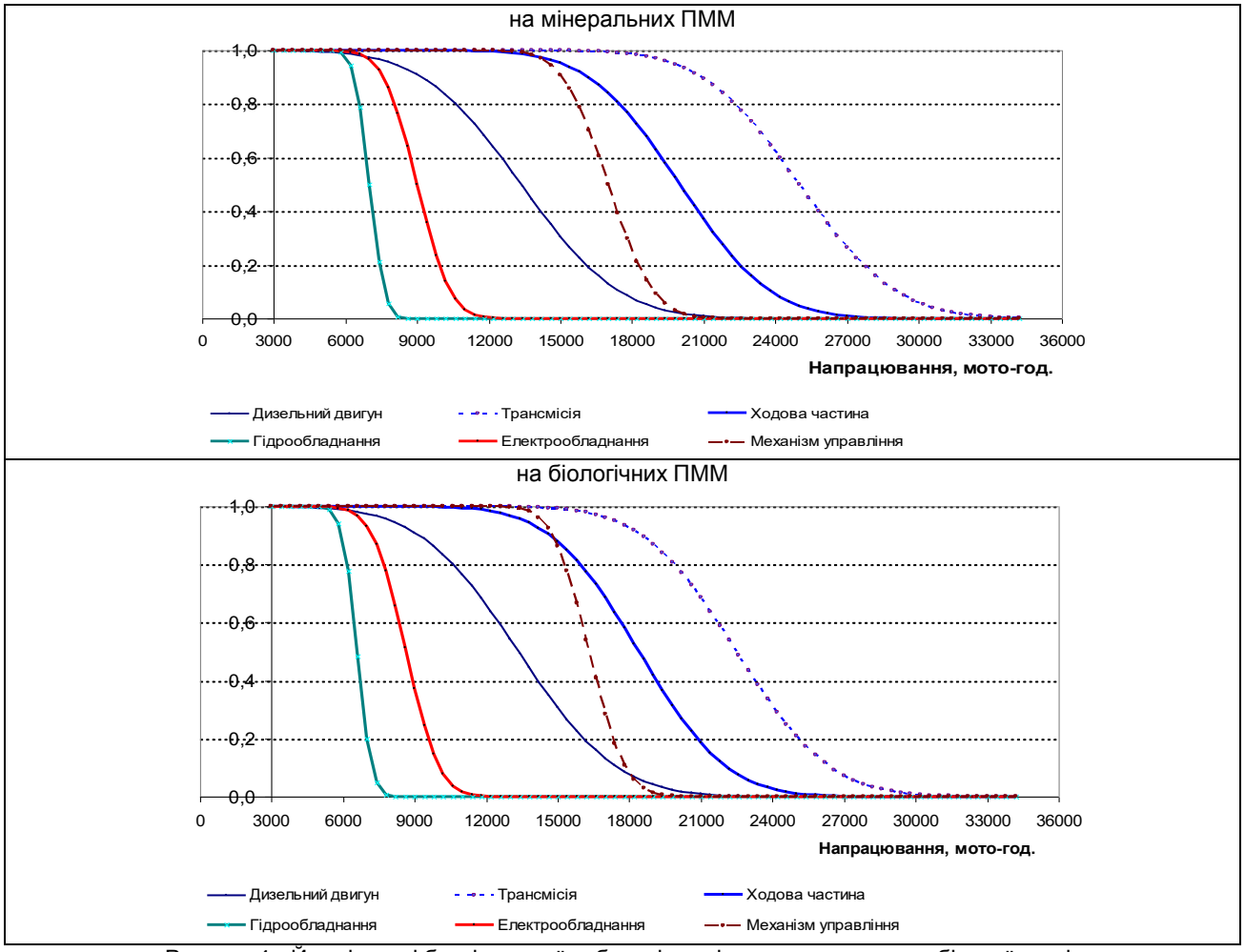


Рисунок 4 - Ймовірності безвідмовної роботи функціональних систем мобільної техніки при роботі на мінеральних та біологічних ПММ

Як видно з рисунку 4 найменш надійними функціональними системами мобільної техніки є електро- і гідрообладнання.

Таке зниження ресурсу функціональних систем мобільної техніки при роботі на біологічних ПММ пояснюється активною дією метанолів біологічних ПММ на матеріали усіх елементів функціональних систем мобільної техніки, що призводить до руйнування поверхонь і збільшення зносу пар тертя.

Ймовірності безвідмовної роботи мобільної техніки при роботі на різних видах ПММ наведені на рис.5.

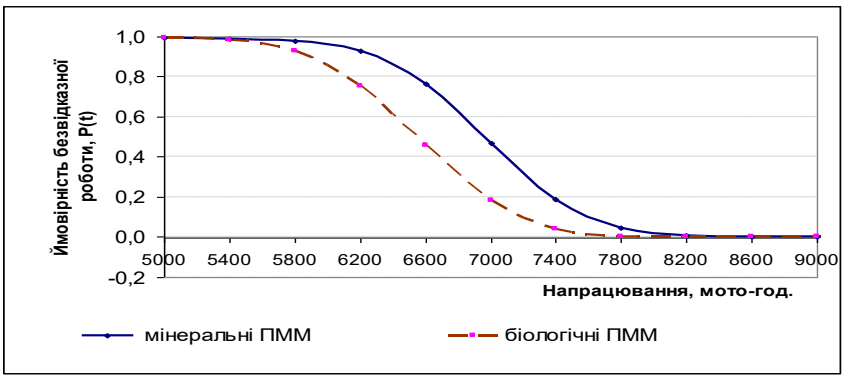


Рисунок 5 - Ймовірності безвідмовної роботи мобільної техніки при роботі на різних видах ПММ

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено, що середній ресурс напрацювання мобільної сільськогосподарської техніки при експлуатації на мінеральних ПММ становить 15667 мото-годин, а на біологічних 14465 мото-годин, що дає зниження середнього ресурсу на 7,67% за рахунок активного впливу метанолу біодизеля і легких фракцій біо-олії на поверхневу структуру пар тертя. Для підвищення ресурсу необхідно покращити хіммотологічні і триботехнічні властивості ПММ та провести деяку заміну матеріалів сполучень на, які інертні в середовищі біологічних паливо-мастильних матеріалів.

Список використаної літератури:

1. Надежность и ремонт машин / под ред. В.В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000.- 776 с.
2. Журавель Д.П. Прогнозирование ресурса трибосопряжений мобильной техники при использовании различных смазочных материалов /Д.П.Журавель, В.Б Юдовинский, С.В.Кюрчев // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК». - Ставрополь: ФГБОУ ВПО Ставропольский государственный аграрный университет, 2013. - С.50-54.
3. Надійність сільськогосподарської техніки / М. І. Черновол [и др.] ; за ред. М. І. Черновола. - 2-ге вид., переробл. і допов. - Кіровоград : КОД, 2010. – 168 с.
4. Журавель Д.П. До прогнозування ресурсу мобільної техніки / Д.П.Журавель, Е.К. Посвятенко //Матеріали LXIX наукової конференції професорсько-викладацького складу національного транспортного університету. – К:НТУ,2013. - С.5-8.
5. Журавель Д.П. Сравнительная оценка надёжности плунжерных пар топливной аппаратуры дизелей на различных видах топлив/ Д.П.Журавель, В.А.Дідур, В.Б Юдовинский, В.А. Коломоец // Материалы международной научно-технической конференции «Научно-технический прогрес в сельскохозяйственном производстве».-Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2014. – С.250-257.
6. Журавель Д.П. Методология обеспечения надежности мобильной техники при использовании биологических ТСМ/ Д.П.Журавель//Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції пам'яті І.І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України».-Мелітополь: ТДАТУ, 2015. – С.8-9.

Журавель Д.П. МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РАЗНЫХ ВИДАХ ТОПЛИВО - СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Работа посвящена разработке методологии оценки надежности мобильной сельскохозяйственной техники при эксплуатации ее на различных видах топлива - смазочных материалов

Ключевые слова: *работоспособность, надежность, горюче-смазочные материалы, функциональные системы, вероятность, функция готовности, средний ресурс*

Zhuravel D.P. METHODOLOGY OF RELIABILITY ASSESSMENT OF MOBILE AGRICULTURAL MACHINERY OPERATING AT DIFFERENT TYPES OF FUELS - LUBRICANTS

It is devoted to the development of a methodology for assessing the reliability of mobile agricultural machinery in the operation of its various types of fuel – lubricants

Keywords: *workability, reliability, fuel and lubricants, functional systems, the likelihood function is ready, the average life*

Стаття надійшла в редакцію: 06.10.2016
Рецензент: д.т.н., проф. Ревенко І.І.