УДК **62-192.004**

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ГОТОВНОСТІ ПАСИВНО РЕЗЕРВОВАНОЇ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

А.І. Бойко, *доктор технічних наук, професор*
Національний університет біоресурсів і природокористування України
О.В. Бондаренко, *кандидат технічних наук, доцент*
Миколаївський національний аграрний університет
В.М. Савченко, *кандидат технічних наук*
Житомирський національний агроекологічний університет

Наведено результати теоретичних досліджень для комплексної оцінки загального стану і тенденцій змін надійної роботи сільськогосподарських машин. Побудовано стохастичну модель станів і переходів підсистем при пасивному резервуванні.

Ключові слова: *пасивне резервування, інтенсивність відмов, інтенсивність відновлень, граф станів.*

Постановка проблеми. Резервування є одним з найбільш ефективних методів підвищення надійності технічних систем. Ширше його застосування в машинобудуванні стримується необхідністю введення додаткових елементів (запасних частин), способів і доступність періодичних регулювань, а також закладених у конструкцію можливостей відновлень роботоздатності деталей у вигляді переточувань, використання додаткових робочих граней і таке інше. Іншою причиною недостатнього застосування пасивного резервування є відсутність науково обґрунтованих рекомендацій щодо ефективного його використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деякі проблеми визначення функції готовності підсистем сільськогосподарської техніки в умовах старіння та розвитку бази технічного обслуговування присвячено дослідження [1], де побудовано відповідний граф і стохастичну математичну модель станів і переходів для систем «машина – технічне обслуговування». Але в даному дослідженні зовсім не приділено уваги ненавантаженому (холодному) резервуванню з метою забезпечення необхідного рівня надійності існуючого сучасного парку сільськогосподарських машин.

Метою роботи є проведення теоретичних досліджень, які присвячені комплексній оцінці загального стану і тенденціям змін, спрямованих на забезпечення надійної роботи сільськогосподарської техніки.

Результати досліджень. Як правило, пасивно резервовані технічні системи сільськогосподарського призначення є такими, що відновлюються, тобто працюють при періодичних ремонтах і сервісних обслуговуваннях. Розмічений граф, який характеризує роботу таких систем, при поступовому їх старінні і незмінному потенціалі бази технічного обслуговування представлено на рис. 1 [1].

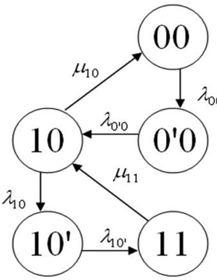

Рис.**1.** Розмічений граф станів і переходів системи при пасивному резервуванні, старіючій техніці і незмінному рівні сфери технічного обслуговування: «**00**» – роботоздатний стан, коли основний і резервний елементи справні; «**10**» – роботоздатний стан, коли основний елемент відмовив, а резервний справний; «**11**» – нероботоздатний стан, коли основний і резервний елементи відмовили; «**0'0**» і «**10'**» – проміжні стани

Безвідмовність відновлюваної системи кращим чином характеризується комплексним показником надійності, яким є коефіцієнт готовності. В динаміці змін фізичного стану технічної системи при її старінні коефіцієнт готовності стає функцією часу і набуває значення функції готовності (нестаціонарного коефіцієнта готовності).

Враховуючи, що єдиним станом відмови даної системи є стан «11» функцію готовності системи до виконання роботи простіше визначити через ймовірність знаходження системи у цьому стані $Кг(t) = 1 - P_{11}(t)$.

Таким чином, постає необхідність у визначенні ймовірності відмов системи $P_{11}(t)$. У перетвореннях Лапласа вона представлена ймовірністю $P_{11}(t) \leftrightarrow \varphi_{11}(S)$, яка, згідно з правилом Крамера, дорівнює

$$\varphi_{11}(S) = \frac{\Delta_{11}}{\Delta}, \qquad (1)$$

де Δ_{11} – матриця системи рівнянь (7) [2] для невідомої $\varphi_{11}(S)$.

Виходячи з розширеної матриці системи (7) [2], для знаходження невідомої $\varphi_{11}(S)$ замінимо стовбець членів при ній на стовбець вільних членів. Тоді матрицю представлено у виді:

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} S+\lambda_{00} & 0 & -\mu_{10} & 0 & 1 \\ -\lambda_{00} & S+\lambda_{0'0} & 0 & 0 & 0 \\ S & S & S & S & 1 \\ 0 & 0 & -\lambda_{10} & S+\lambda_{00'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_{10'} & 0 \end{vmatrix}.$$

Вирішення матриці шляхом пониження її рангу, алгебраїчних перетворень і спрощень приводить до кінцевого результату

$$\Delta_{11} = 2S^2\lambda_{0'0}\lambda_{10'} + S\left(\lambda_{0'0}\lambda_{10}\lambda_{10'} + 2\lambda_{00}\lambda_{10}\lambda_{10'} + \lambda_{0'0}\lambda_{10}\lambda_{10'}\right) +$$
$$+\lambda_{00'}\lambda_{0'0}\lambda_{10}\lambda_{10'}. \qquad (2)$$

Членами степені малості λ^3 і більше для практичних цілей аналізу без суттєвої втрати точності результату можна знехтувати. Тоді рівняння (2) представляється у спрощеному вигляді $\Delta_{11} = 2S^2\lambda_{10}\lambda_{10}$.

Оскільки значення основної матриці Δ встановлено раніше [3], то ймовірність відмов $\varphi_{11}(S)$, виходячи з (1), однозначно визначена і представляється у спрощеному вигляді таким чином

$$\varphi_{11}(S) = \frac{2S^2\lambda_{10}\lambda_{10'}}{S^3\left(aS^2 + bS + c\right)}, \qquad (3)$$

де $a = 1$;

$$b = \left(\mu_{11} + \lambda_{10'} + \lambda_{10} + \lambda_{0'0} + \lambda_{00} + \lambda_{10}\right);$$

$$c = \begin{pmatrix} \lambda_{10'}\mu_{11} + \lambda_{10}\lambda_{10'} + \mu_{11}\lambda_{10} + \lambda_{0'0}\mu_{11} + \lambda_{0'0}\lambda_{10'} + \\ +\lambda_{0'0}\lambda_{10} + \lambda_{00}\mu_{11} + \lambda_{00}\lambda_{10'} + \lambda_{00}\lambda_{10} + \\ +\lambda_{0'0}\lambda_{0'0} - \mu_{10'}\mu_{11} + \mu_{10}\lambda_{10'} + \mu_{10}\lambda_{0'0} \end{pmatrix}.$$

У відображеннях Лапласа функція готовності записується у вигляді $Кг(t) \leftrightarrow \varphi_{Кг}(S)$

$$\varphi_{Кг}(S) = \frac{1}{S} - \varphi_{11}(S).$$

Підставивши в представлений вираз значення ймовірностей $\varphi_{11}(S)$ з (3), маємо

$$\varphi_{Кг}(S) = \frac{1}{S} - \frac{2S^2\lambda_{10}\lambda_{10'}}{aS^5 + bS^4 + cS^3}.$$

Провівши алгебраїчні операції і скорочення, у кінцевому вигляді запишемо

$$\varphi_{Кг}(S) = \frac{S^2 + bS + \left(c - \lambda_{10}\lambda_{10'}\right)}{S\left(S^2 + bS + c\right)}. \qquad (4)$$

Для виконання зворотних перетворень від зображення до оригіналу необхідно ймовірність $\varphi_{Кг}(S)$ представити у вигляді суми простих дробів виду

$$\varphi_{Кг}(S) = \frac{A_{11}}{S - S_1} + \frac{B_{11}}{S - S_2} + \frac{C_{11}}{S - S_3} + \frac{D_{11}}{S - S_4} + \frac{E_{11}}{S - S_5},$$

де A_{11}, B_{11}, C_{11}, D_{11}, E_{11} – невідомі сталі величини, які необхідно визначити для зворотнього перетворення Лапласа;

S_1-S_5 – корені рівняння знаменника (3).

Враховуючи, що $S_1 = S_2 = S_3 = 0$ [3], і привівши до загального знаменника, маємо

$$\varphi_{Кг}(S) = \frac{\left(A_{11} + B_{11} + C_{11}\right)\left(S - S_4\right)\left(S - S_5\right) + D_{11}S\left(S - S_5\right) + E_{11}S\left(S - S_4\right)}{S\left(S - S_4\right)\left(S - S_5\right)}.$$

Виписавши по степенях невідомої і ввівши заміну A_{11} + B_{11} + C_{11} = $Ж_{11}$ запишемо

$$\varphi_{Кг}(S)=\frac{S^2\left(Ж_{11}+D_{11}+E_{11}\right)-S\left(Ж_{11}S_5+Ж_{11}S_4+D_{11}S_5+E_{11}S_4\right)+Ж_{11}S_4S_5}{S\left(S-S_4\right)\left(S-S_5\right)}. \quad (5)$$

Виходячи з еквівалентності поліномів (4) і (5) в чисельниках, вони рівні, якщо рівні між собою коефіцієнти при невідомих у однакових степенях. Випишемо ці коефіцієнти

$$\begin{array}{l|ll}
S^2 & 1 & Ж_{11}+D_{11}+E_{11} \\
S^1 & b & -\left(Ж_{11}S_5+Ж_{11}S_4+D_{11}S_5+E_{11}S_4\right) \\
S^0 & c-2\lambda_{10}\lambda_{10'} & Ж_{11}S_4S_5
\end{array}$$

Складемо нову систему рівнянь для визначення введених сталих величин

$$\begin{cases}1=Ж_{11}+D_{11}+E_{11}\\ b=-\left(Ж_{11}S_5+Ж_{11}S_4+D_{11}S_5+E_{11}S_4\right)\\ c-2\lambda_{10}\lambda_{10'}=Ж_{11}S_4S_5\end{cases}$$

Вирішуємо систему рівнянь методом підстановки. З третього рівняння маємо

$$Ж_{11}=\frac{c-\lambda_{10}\lambda_{10'}}{S_4S_5}. \quad (6)$$

З першого рівняння запишемо

$$D_{11}=1-Ж_{11}-E_{11}. \quad (7)$$

Підставляючи значення D_{11} і $Ж_{11}$ в друге рівняння алгебраїчної системи

$$-b=\left(\frac{c-\lambda_{10}\lambda_{10'}}{S_4S_5}S_5+\frac{c-\lambda_{10}\lambda_{10'}}{S_4S_5}S_4+\left(1-\frac{c-\lambda_{10}\lambda_{10'}}{S_4S_5}-E_{11}\right)S_5+E_{11}S_4\right).$$

Після скорочень і перетворень у кінцевому вигляді стала величина Е11 дорівнює

$$E_{11}=\frac{1}{S_5-S_4}\left(b+\frac{c-2\lambda_{10}\lambda_{10'}}{S_5}+S_5\right). \quad (8)$$

Зворотною підстановкою в (7) отримаємо

$$D_{11} = 1 - \frac{c - 2\lambda_{10}\lambda_{10'}}{S_4 S_5} - \frac{1}{S_5 - S_4}\left(b + \frac{c - 2\lambda_{10}\lambda_{10'}}{S_5} + S_5\right). \qquad (9)$$

Таким чином, всі введені сталі величини для здійснення зворотнього перетворення Лапласа визначені рівняннями (6), (8) і (9). Тоді, виконуючи правило перетворень, можна записати функцію готовності у вигляді

$$Кг(t) = Ж_{11} + D_{11}\exp(-S_4 t) + E_{11}\exp(-S_5 t). \qquad (10)$$

Аналіз отриманої функції готовності показує, що в момент початку роботи системи, коли $t = 0$, підставляючи значення складових у формулу (10), маємо

$$Кг(t=0) = Ж_{11} + (1 - Ж_{11} - E_{11})\exp(-S_4 t) + E_{11}e^{-S_5 t} = 1.$$

Тобто система повністю готова до експлуатації.

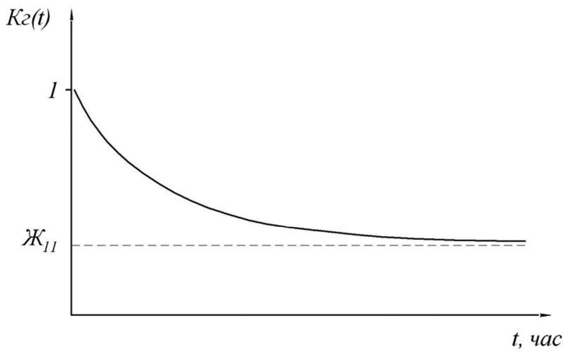

Рис.**2.** Залежність коефіцієнту готовності пасивно дубльованої старіючої системи від часу її експлуатації

Другим крайнім випадком для системи є ситуація, коли час її експлуатації прямує до нескінченності $t \to \infty$. Тоді, підставляючи значення складових в функцію готовності (10), отримаємо

$$Кг\,(t \to \infty) = Ж_{11}.$$

Ввівши значення $Ж_{11}$, маємо

$$Кг\left(t \to \infty\right) = \frac{c - 2\lambda_{10}\lambda_{10'}}{S_4 S_5}.$$

Графічно функцію готовності представлено на рис. 2.

Висновки. Таким чином, функція готовності дубльованої системи, що досліджується, змінюється згідно з подвійним експоненціальним законом. Такий закон зміни готовності характерний для систем, що втрачають роботоздатність при формуванні раптових відмов. Дослідженням встановлено фінальну величину функції готовності, яка набуває значення коефіцієнта готовності при переході системи в усталений режим експлуатації.

Список використаних джерел:

1. Бойко А. І. Дослідження функції готовності механічних систем при накопичуванні пошкоджень / А. І. Бойко, К. М. Думенко // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : збірник наукових праць ДНУ. — Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2010. — Вип. 14. — С. 72—78.
2. Бойко А. І. Математична формалізація опису станів і переходів пасивно резервованих технічних систем / А. І. Бойко, О. В. Бондаренко, В. М. Савченко // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка : Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. — Харків, 2013. — № 133. — С. 216—220.
3. Погорілий Л. В. Зернозбиральна техніка: проблеми, альтернативи, прогноз / Л. В. Погорілий, С. М. Коваль // Техніка АПК. — 2003. — № 7. — С. 4—7.

А.І. Бойко, О.В. Бондаренко, В.М. Савченко. ***Исследование показателей надежности и эксплуатационной готовности пассивно резервируемой технической системы.***

Приведены результаты теоретических исследований для комплексной оценки общего положения и тенденций изменений надежной работы сельскохозяйственных машин. Построена стохастическая модель состояний и переходов подсистем при пассивном резервировании.

A. Boyko, O. Bondarenko, V. Savchenko. Research indexes of reliability and operational readiness passive redundant technical system.

The results of theoretical researches are resulted for the complex estimation of the common state and tendencies of changes of reliable work of machines for collection. The stochastic model of the states and transitions of subsystems is built at the passive reserving.