

УДК 62-7:631.354.2

## **ФУНКЦІ ВІДНОВЛЕННЯ ПІДСИСТЕМ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ ПРИ РІЗНИХ РІВНЯХ ПОТЕНЦІАЛУ БАЗИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ**

Думенко К.М., к.т.н.,

*Миколаївський державний аграрний університет*

Тел. (050) 77–66–333;

Бойко А.І., д.т.н.,

*Національний університет біоресурсів і природокористування  
України*

Тел. (050) 53–90–988;

Бондаренко О.В., к.т.н.

*Миколаївський державний аграрний університет*

Тел. (095) 04–45–768.

**Анотація** – викладено результати математичного дослідження функції відновлення зернозбиральних комбайнів при різних рівнях потенціалу бази їх технічного обслуговування, яке базується на рівняннях динамічного балансу ймовірностей.

**Ключові слова** – складна техніка, обслуговування, надійність, комбайн, функція відновлення, рівняння Колмагорова .

*Постановка проблеми.* У реальній експлуатації технічний стан зернозбиральних комбайнів не залишається постійним. Якщо в перші роки можливе навіть деяке зменшення інтенсивності відмов внаслідок усунення недоліків виробництва, а також виявлення скритних дефектів в окремих деталях, то в періоди подальшої експлуатації потік відмов поступово зростає [1]. Особливо їх інтенсивність збільшується в період “старіння” техніки. Це об’єктивний процес втрати роботоздатності, який характерний не тільки для складних сільськогосподарських машин, але і для інших технічних систем. Відмінністю сільськогосподарських машин, внаслідок важких умов експлуатації, може бути тільки скорочений період стабілізації інтенсивності відмов з раннім переходом до її зростання при незворотньому “старінні” техніки. Прискоренню цього процесу сприяє використання в розробках звичайних конструкційних матеріалів, які не завжди відповідають вимогам до необхідних фізико-механічних властивостей. У наслідок цього в деталях інтенсифікуються процеси втомленості, зношування, корозії та інше.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Не можна не погодитися з думкою, яка була висловлена у роботі [2] про практичну відсутність вітчизняного зернокомбайнобудування. Спроби створити вітчизняні комбайни на рівні кращих зарубіжних зразків закінчились дрібносерійним виробництвом не досить досконалих машин. У цій ситуації сільгоспвиробники вимушені купувати закордонні комбайни. Однак нова техніка надто дорога і не завжди адаптована до місцевих умов експлуатації. Виникають також проблеми у підготовці обслуговуючого персоналу як в експлуатації машин, так і в їх сервісному технічному обслуговуванні.

За останні 15 років Української державності повністю відсутні, будь-які фундаментальні дослідження пов'язані з проблемою надійності вітчизняної зернозбиральної техніки, а тим більше з підвищенням рівня надійності старіючих комбайнів. Відсутні нові оригінальні технічні рішення наведеної проблеми.

*Виділення невирішеної частини загальної проблеми.* Метою даного дослідження є встановлення функції відновлення механічних систем, рівень надійності яких знижується зі збільшенням наробітку.

Для багатьох підсистем зернозбиральних комбайнів типовою ситуацією з позицій надійності є поступове збільшення інтенсивностей відмов при відсутності резервувань. У таких випадках формування потоків відмов не може бути описано як марківський випадковий процес переходів систем в різні можливі (роботоздатні чи нероботоздатні) стани. Важливою причиною, що також негативно впливає на показники надійності зернозбиральної техніки, слід вважати недостатній об'єм і рівень своєчасних технічних обслуговувань машин. Причину цього можна бачити, по-перше, в ускладненні самих комбайнів, які потребують більш високої культури і технологій обслуговування. Сюди входить і необхідна кваліфікація персоналу, а також наявність діагностичних стендів, приладів, методик і прийомів ведення робіт. По-друге, виникає потреба у відповідному оснащенні сервісних і ремонтних підприємств сучасним обладнанням для відновлення роботоздатності машин. Нажаль, домінуючим на сьогодні фактом є необхідність проведення обслуговуючих і ремонтних дій в основному на обладнанні минулих років, яке, як правило, морально і фізично застаріло.

Приведені факти у відношенні до проблем виявлення закономірностей зміни показників надійності зернозбиральних комбайнів показують, що для формалізації і опису цього процесу необхідно розглядати технічні підсистеми комбайнів в поєднанні з підсистемами їх технічного обслуговування. Такий системний підхід відкриває можливість виявлення комплексних показників надійності, які включають не тільки періоди роботоздатних станів машин, але і

періоди, що пов'язані з їх технічним обслуговуванням. Таким чином, виникає необхідність опису переходів підсистем комбайнів з роботоздатних станів в нероботоздатні і зворотньо з нероботоздатних в роботоздатні під дією ремонтних операцій.

*Основна частина.* Проблемою математичної формалізації поведінки таких технічних систем є нестабільність інтенсивностей їх переходів з стану в стан. При змінних величинах інтенсивностей переходів, обумовлених «старінням» як самої техніки, так і бази її технічного обслуговування, процеси не можуть розглядатися як марківські потоки, а значить і не може бути використаний відповідний математичний апарат. Таким чином неекспоненціальність розподілу часу знаходження підсистем як в роботоздатному, так і в нероботоздатному стані унеможливорює вважати процеси переходів підсистем, як найпростіші.

Для зведення формалізації поведінки таких підсистем, що мають інтенсивності зі збільшенням, доцільно використати введення в опис підсистем штучних фіктивних станів [3-5]. Тоді кожен з переходів фактично розбивається на два суміжних, які можуть бути за описом близькими до розподілень Ерланга з відповідними інтенсивностями переходів підсистем.

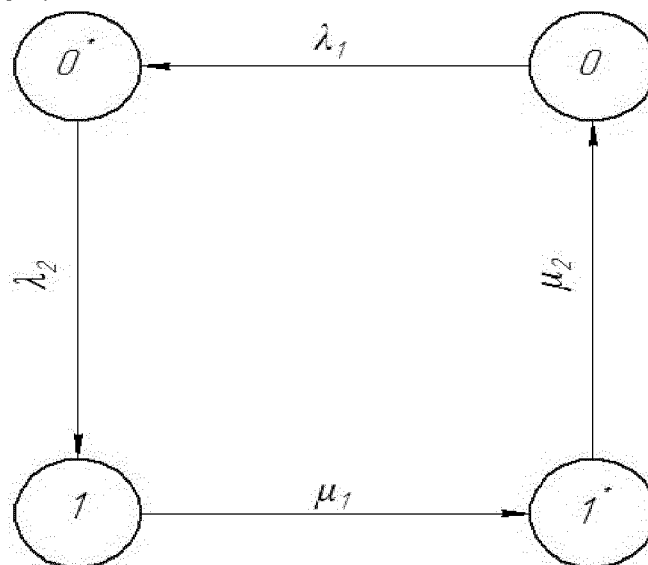


Рис. 1. Граф станів і переходів «старіючих» підсистем зернозбирального комбайна при «старіючих» базах їх технічного обслуговування:  $\lambda_1$  – інтенсивність переходу з роботоздатного стану в фіктивний роботоздатний;  $\lambda_2$  – інтенсивність переходу з фіктивного роботоздатного стану в нероботоздатний;  $\mu_1$  – інтенсивність переходу з нероботоздатного стану в фіктивний нероботоздатний;  $\mu_2$  – інтенсивність переходу з фіктивного нероботоздатного в роботоздатний.

Граф переходів для «старіючих» підсистем комбайнів і «старіючих» баз їх технічного обслуговування представлений на (рис. 1).

На представленому графі показано, що підсистема має один роботоздатний стан «0» і один нероботоздатний «1». Фіктивний нероботоздатний стан позначений – «1\*» і фіктивний роботоздатний стан позначений – «0\*».

У відповідності з побудованим графом переходів підсистем записуються диференціальні рівняння для динамічного балансу ймовірностей станів систем:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}P_0(t) = \mu_2 \cdot P_1^*(t) - \lambda_1 \cdot P_0(t); \\ \frac{d}{dt}P_0^*(t) = \lambda_1 \cdot P_0(t) - \lambda_2 \cdot P_0^*(t); \\ \frac{d}{dt}P_1(t) = \lambda_2 \cdot P_0^*(t) - \mu_1 \cdot P_1(t); \\ \frac{d}{dt}P_1^* = \mu_1 \cdot P_1(t) - \mu_2 \cdot P_1^*(t). \end{cases} \quad (1)$$

Нормуючою умовою ймовірностей знаходження системи в різних можливих станах є сума  $P_0(t) + P_0^*(t) + P_1(t) + P_1^*(t) = 1$ .

Згідно графу станів і переходів підсистем комбайнів (рис.1) єдиним неробочим є стан «1», де підсистеми знаходяться на технічному обслуговуванні. Таким чином, ймовірність знаходження системи в нероботоздатному стані і зміна цієї ймовірності в часі буде відображувати функцію відновлення. Тобто можна записати:  $P_1(t) = K\vartheta(t)$ .

У перетвореннях Лапласа система диференціальних рівнянь (1) при заміні четвертого рівняння на нормуючу умову записується як алгебраїчна система:

$$\begin{cases} S \cdot \varphi_0(S) = -\lambda_1 \cdot \varphi_0(S) + \mu_2 \varphi_1^*(S) + 1; \\ S \cdot \varphi_0^*(S) = \lambda_1 \cdot \varphi_0(S) - \lambda_2 \varphi_0^*(S); \\ S \cdot \varphi_1(S) = \lambda_2 \cdot \varphi_0^*(S) - \mu_1 \varphi_1(S); \\ S \cdot \varphi_0(S) = +S \cdot \varphi_0^*(S) + S \cdot \varphi_1(S) + S \varphi_1^*(S) = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Після ранжирування відносно невідомих  $\varphi_i(S)$  систему можна представити таким чином:

$$\begin{cases} (S + \lambda_1)\varphi_0(S) - \mu_2 \varphi_1^* = 1; \\ (S + \lambda_2)\varphi_0^*(S) - \lambda_1 \varphi_0 = 0; \\ (S + \mu_1)\varphi_1(S) - \lambda_2 \varphi_0^* = 0; \\ S\varphi_0(S) + S\varphi_0^* + S\varphi_1(S) + S\varphi_1^*(S) = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Виписавши коефіцієнти при невідомих отримаємо визначник (детермінант) системи рівнянь. Праворуч представлений стовбець вільних членів:

$$\Delta = \begin{vmatrix} (S + \lambda_1) & 0 & 0 & -\mu_2 \\ -\lambda_1 & (S + \lambda_2) & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_2 & (S + \mu_1) & 0 \\ S & S & S & S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Шляхом заміни стовпця  $\varphi_1(S)$  на стовбець вільних членів, маємо:

$$\Delta = \begin{vmatrix} (S + \lambda_1) & 0 & 1 - \mu_2 \\ -\lambda_1 & (S + \lambda_2) & 0 \\ 0 & -\lambda_2 & 0 \\ S & S & 1 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Вирішення матриці потребує пониження її рангу з переходом від четвертого рівня до третього. Після виконання цієї операції, знаходження визначника з використанням правила Саррюса, а також визначення величин сталих.

Виконання зворотного перетворення Лапласа дає можливість отримати таку залежність коефіцієнта відновлення:

$$K\theta(t) = A_1 \cdot \exp[-S_1 t] + B_1 \cdot \exp[S_2 t] + C_1 \cdot \exp[-S_3 t] + D_1 \cdot \exp[-S_4 t];$$

або

$$K\theta(t) = 2E_1 + C_1 \cdot \exp[-S_3 t] + D_1 \cdot \exp[-S_4 t];$$

підставляючи значення сталих  $E_1$ ,  $C_1$  і  $D_1$  маємо

$$K\theta(t) = 2 \frac{\mu_2 \lambda_1 \lambda_2}{2S_3 S_4} - \left[ \frac{\lambda_1 \lambda_2 + \frac{\mu_2 \lambda_1 \lambda_2}{S_3 S_4} (S_4 + S_3 - 1)}{1 + S_3} - \frac{\mu_2 \lambda_1 \lambda_2}{S_3 S_4} \right] \exp[-S_3 t] + \left[ \frac{\lambda_1 \lambda_2 + \frac{\mu_2 \lambda_1 \lambda_2}{S_3 S_4} (S_4 + S_3 - 1)}{1 + S_3} \right] \exp[-S_4 t] \quad (6)$$

Отримане рівняння (6) представляє собою функцію відновлення (простою), що показує ймовірність нероботоздатного стану підсистем комбайну в довільний момент часу при старіючій технічній системі та старіючого потенціалу технічного обслуговування.

Функція простою, як і функція готовності має три складові, що відображають установлений і перехідні періоди роботи підсистем. Як видно з рівняння (6), перша складова не залежить від часу, дві інші – залежать і відображають зміну функції відновлення (простою).

Підставляючи у формулу (6) момент початку роботи, коли  $t = 0$  після скорочень маємо, що  $K_B(t = 0) = 0$ .

Отриманий результат ще раз підкреслює, що на початку роботи, згідно прийнятих умов, підсистеми комбайну знаходяться у роботоздатному стані і не потребують відновлень.

При нескінченному збільшенні часу експлуатації ( $t \rightarrow \infty$ ) функція відновлення асимптотично наближується до свого граничного установленого значення. Величина цієї асимптоти визначається при підстановці в рівняння (6)  $t \rightarrow \infty$ . Тоді після скорочень і заміни, маємо

$$K_B(t \rightarrow \infty) = \frac{\mu_1 \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 \mu_1 + \lambda_1 \mu_1 + \lambda_1 \lambda_2 + \mu_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_2 + \mu_2 \lambda_1} \quad (7)$$

Як видно з отриманого результату функція відновлення (простою) залежить від інтенсивностей відмов  $\lambda$  і відновлення  $\mu$ . Вона комплексно характеризує надійність підсистем і одночасно враховує як їх безвідмовність, так відновлюваність (ремонтпридатність). Графічно функція відновлення (простою) представлена на рис. 2.

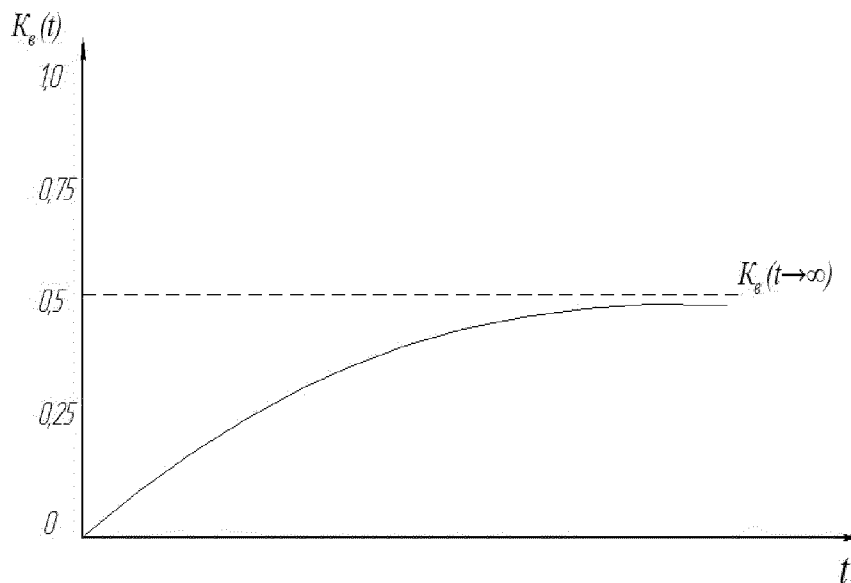


Рис. 2. Зміна функції відновлення (простою) від часу.

Установлене значення функції відновлення (простою), яке має конкретну величину представлену формулою (7), несе поняття коефіцієнту відновлення і не залежить від початкового стану підсистем, що розглядаються.

Природній процес “старіння” машин по можливості стримується сферою технічного обслуговування і ремонту техніки. В останній час у зв’язку з постійним збільшенням кількості імпортованих машин

можна спостерігати розвиток бази технічного обслуговування (сервісних центрів) нового покоління. Фірмовий сервіс, як правило привносить нові елементи технологій і обладнання для обслуговування машин. Насамперед це діагностичне обладнання з передовими технологіями комп'ютерної обробки результатів вимірювань. Крім того, оновлення сфери технічного обслуговування зернових комбайнів пов'язане з більш широким впровадженням в конструкції машин гідросистем і приводів, елементів своєчасного контролю за станом підсистем, попередження можливих перевантажень, забивань і аварійних пошкоджень.

Так чи інакше введення сучасних центрів сервісного технічного обслуговування зернозбиральної техніки можна розглядати як оновлення бази підтримки машин у роботоздатному стані.

Таким чином, з позицій системного аналізу надійності зернозбиральних комбайнів, у даному дослідженні розглядається ситуація, коли машини поступово знижують свій технічний рівень, а ремонтна база, що пов'язана з їх технічним обслуговуванням, навпаки, нарощує свої потенційні можливості. У результаті як одна, так і друга підсистеми знаходяться в умовах змінних інтенсивностей протікання подій, що формують свої особливі потоки.

Ці потоки внаслідок змінних інтенсивностей не можуть розглядатися як найпростіші, а значить для математичного опису потребують спеціальних заходів. “Старіюча” підсистема техніки, що експлуатується формує Ерлангівський розподіл часу безвідмовної роботи. Навпаки, “молодіюча” підсистема, що пов'язана з технічною базою обслуговування машин, у своєму розвитку формує потік з гіперекспоненціальним розподілом часу відновлень.

Для математичного опису таких зустрічнонаправлених потоків і встановлення показників надійності підсистем комбайнів побудовано відповідний граф станів і переходів (рис. 3).

У графі штучно введено два фіктивних стани. Вони необхідні для зведення потоків відмов зі змінною інтенсивністю  $\lambda$  і потоків відновлень зі змінною інтенсивністю  $\mu$  до найпростіших Марківських, що допускають застосування відповідного математичного апарату.

Єдиним роботоздатним станом системи, що аналізується, є стан “0”. У зв'язку з поступовою втратою роботоздатності вузлів і деталей комбайнів при “старінні” система переходить з інтенсивністю  $\lambda_0$  у фіктивний роботоздатний стан “0'”. У подальшому у зв'язку з переходом до відновлень процес для “молодіючої” підсистеми обслуговувань може розвиватися паралельними шляхами, але з відповідними ймовірностями.

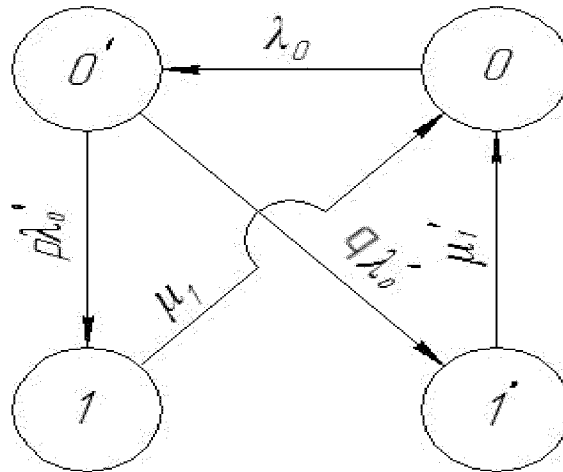


Рис. 3. Граф станів і переходів для “старіючих” технічних систем і “молодіючої” бази їх технічних обслуговувань.

Так, із стану “0” з ймовірністю  $p$  при інтенсивності  $\lambda'_0$  можливий перехід у нероботоздатний стан “1”. Також паралельно з ймовірністю  $q$  при інтенсивності  $\lambda'_0$  можливий перехід в фіктивний нероботоздатний стан “1'”. Причому ймовірність  $p$  і  $q$  доповнюють одна одну до повної групи подій

$$p + q = 1. \quad (8)$$

Таким чином, переходи із стану “0” в суміжні стани “1” і “1'” відбуваються пропорційно вказаним ймовірностям  $p$  і  $q$ .

З положень відновлень “1” і “1'” система при інтенсивностях  $\mu_1$  і  $\mu'_1$  повертається знову в роботоздатний стан “0”.

Вцілому, граф (рис. 3) описує всі можливі стани і переходи системи, що відповідають реальним можливим положенням зернозбиральної техніки. Відмінністю графа є те, що він відображає послідовність подій для “старіючих” підсистем машин і паралельність подій для “молодіючої” підсистеми сфери технічного обслуговування.

Побудований граф станів і переходів допускає математичну формалізацію подій, що відбуваються з системами.

Це можливо за допомогою диференціальних рівнянь динамічного балансу ймовірностей (рівнянь Колмагорова).



$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P_0(t) = \mu_1 \cdot P_1(t) + \mu_1' P_1'(t) - \lambda_0 \cdot P_0(t); \\ \frac{d}{dt} P_0'(t) = \lambda_0 \cdot P_0(t) - p \cdot \lambda_0' P_0'(t) - q \lambda_0' \cdot P_0'(t); \\ \frac{d}{dt} P_1(t) = p \lambda_0' \cdot P_0'(t) - \mu_1' P_1'(t); \\ \frac{d}{dt} P_1'(t) = q \lambda_0' \cdot P_0'(t) - \mu_1' P_1'(t). \end{cases} \quad (9)$$

Нормуюча умова  $P_0(t) + P_0'(t) + P_1(t) + P_1'(t) = 1$ .

Виходячи з графу станів і переходів технічної системи (зернозбирального комбайну) (рис. 3) єдиним його станом, який характеризує простої внаслідок виконання сервісних і ремонтних робіт є стан “1”. Ймовірність знаходження системи в цьому стані визначається як ймовірність  $P_1(t)$ , яка і характеризує відновлення роботоздатності комбайнів. Тобто можна записати, для функції відновлення слідкуючу рівність  $K\theta(t) = P_1(t)$ .

Використовуючи перетворення Лапласа як і для попередньої задачі, правомірно буде записати:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} (S + \lambda_0) & 0 & 1 & -\mu_1' \\ S & S & 1 & S \\ 0 & -p\lambda_0' & 0 & 0 \\ 0 & -q\lambda_0' & 0 & (S + \mu_1') \end{vmatrix}. \quad (10)$$

У результаті отримана квадратна матриця четвертого рангу, вирішення якої здійснюється за сценарієм попередньої задачі.

Таким чином, всі невідомі сталі величини визначені і це дає змогу використовуючи зворотне перетворення Лапласа та записати функцію відновлення (простою):

$$K\theta(t) = A_1 \exp[-S_1 t] + B_1 \exp[-S_2 t] + C_1 \exp[-S_3 t] + D_1 \exp[-S_4 t], \text{ або} \\ K\theta(t) = 2E_1 + C_1 \exp[-S_3 t] + D_1 \exp[-S_4 t]$$

Підставляючи значення сталих величин маємо

$$K\theta(t) = \frac{p\lambda_0'\lambda_0\mu_1'}{S_3 S_4} + \left[ \frac{p\lambda_0'\lambda_0 \left( \frac{\mu_1'}{S_3 S_4} - 1 \right)}{S_4 - S_3} - \frac{p\lambda_0'\lambda_0\mu_1'}{S_3 S_4} \right] \exp(-S_3 t) - \\ - \frac{p\lambda_0'\lambda_0 \left( \frac{\mu_1'}{S_3 S_4} - 1 \right)}{S_4 - S_3} \exp(-S_4 t). \quad (11)$$

Графік функції відновлення представлено на рис. 4.

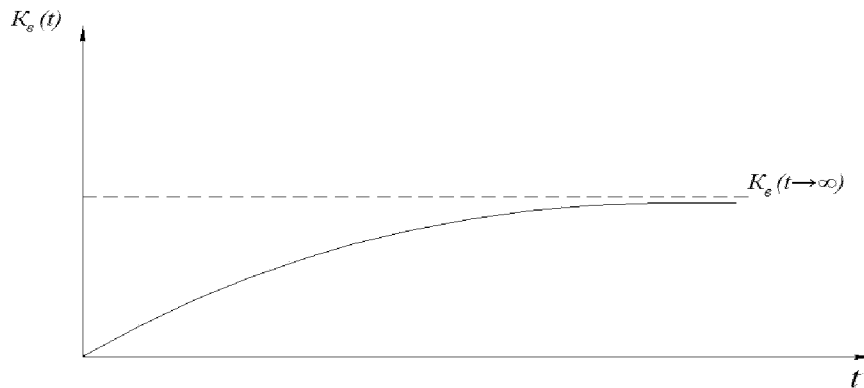


Рис. 4. Залежність функції відновлення від часу для підсистем зернозбирального комбайну при розвитку бази технічного обслуговування.

Аналіз функції відновлення показує, що при необмеженому часі ( $t \rightarrow \infty$ ), вона приймає значення постійної величини яка є асимптотою

$$K_{в}(t \rightarrow \infty) = \frac{p\lambda'_0\lambda_0\mu'_1}{S_3S_4}. \quad (12)$$

Фізично отриману величину можна представити, як коефіцієнт простою технічної системи в установленому режимі експлуатації.

Після підстановки значень, коефіцієнт простою системи записується наступним чином

$$K_{в}(t \rightarrow \infty) = \frac{p\lambda'_0\lambda_0\mu'_1}{\mu_1\mu'_1 + \lambda_0(\mu'_1 + \mu_1) + \lambda'_0(\mu_1 + \lambda_0 + \mu'_1)}.$$

Якщо час експлуатації для системи ще не наступив ( $t = 0$ ), то функція відновлення набуває значення  $K_{в}(t = 0) = 0$ .

Це ще раз підтверджує правомірність отриманих залежностей функцій готовності і відновлення, коли в закладені в досліджені початкові умови експлуатації при  $t = 0$  зернозбиральні комбайни починають роботу з справного стану.

*Висновки.* Отримані результати функцій відновлення старіючих підсистем зернозбиральних комбайнів при різних рівнях потенціалу їх технічного обслуговування дають можливість оцінити з позиції надійності складну ситуацію в сфері зернозбиральної техніки і дає можливість вирішити важливу народногосподарську задачу з прогнозування безвідмовної роботи старіючої техніки в періоди збирання врожаю.

## Література

1. *Погорілий Л.* зернозбиральна техніка: проблеми, альтернативи, прогноз / *Л. Погорілий, С. Ковал., В. Ясенецький.* // Техніка АПК. — 2003. — № 7. — С. 4—7.
2. *Власенко В.* Перспективна техніка для збирання зернових культур: комбайн «Єнісей» // Техніка АПК — 2004р. — № 6—7. — 24 с.
3. *Нечипоренко В. И.* Структурный анализ систем (эффективности и надежности) / *В. И. Нечипоренко.* — М. : Советское радио, 1977. — 211 с.
4. *Червоний А. А.* Надежность сложных систем / *А. А. Червоний., В. И. Лук'ященк., Л. В. Коти.* — 2-е изд., переработанное и дополненное. — М.:Машиностроение, 1976. — 286 с.

**ФУНКЦИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМ  
ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ  
ПОТЕНЦИАЛА БАЗЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Думенко К.Н., Бойко А.И., Бондаренко А.В.

*Аннотация* — изложены результаты математического исследования функции восстановления зерноуборочных комбайнов при различных уровнях потенциала базы их технического обслуживания, которое базируется на уравнениях динамического баланса вероятностей.

**FUNCTIONS OF PROCEEDING IN SUBSYSTEMS OF  
COMBINE HARVESTERS ARE AT DIFFERENT LEVELS OF  
POTENTIAL OF BASE OF TECHNICAL SERVICE**

K. Dumenko, A. Bojko, O. Bondarenko.

*Summary*

The results of mathematical research of function of proceeding in combine harvesters are expounded at the different levels of potential of base them technical service which is based on equalizations of dynamic balance of probabilities.