

**АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ РЕЖИМІВ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ
ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ**

Д. Ю. КАЛІНІЧЕНКО, аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-3689-3467>

І. Л. РОГОВСЬКИЙ, кандидат технічних наук, с. н. с.,

<https://orcid.org/0000-0002-6957-1616>*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

E-mail: rogovskii@nubip.edu.ua

<https://doi.org/10.31548/dopovidi2019.05.015>

***Анотація.** У залежності від постановки задачі оптимізації можливі різні варіанти її вирішення, в тому числі такі, що передбачають зміни не тільки параметрів технічного стану зернозбиральних комбайнів, але й структури самого режиму технічного контролю, в частині розробки і використання різних комбінаторних і комплексних моделей з різними видами технічного контролю; за фактичним технічним станом, що може бути пов'язано з необхідністю його безперервного або періодичного технічного контролю.*

Поряд з критерієм граничного допустимої ймовірності відмови для визначення тривалості експлуатації комбайна між почерговими технічними контролюями використовуються також економіко-математичні критерії. При цьому вимоги до технічної готовності комбайна виконують роль обмеження. Тоді задача керування технічною готовністю зернозбирального комбайна при експлуатації може бути формалізована за загальновідомим принципом, який представляє собою алгебраїчну суму добутку всіх можливих ймовірностей втрати працездатності і збитків від простоїв комбайна з цих подій. Доведено доцільність застосування методу визначення оптимальної періодичності технічного контролю зернозбиральних комбайнів при заданих параметрах інтенсивностей відмов, трудомісткістю технічного контролю і відношення затрат при відмові до затрат на технічний контроль дозволяє мінімізувати значення величини сукупної оптимізаційної функції забезпечення технічного готовності комбайна і забезпечить оптимальне керування цим процесом.

***Ключові слова:** модель, стохастичність, адекватність, оптимізація, режим, контроль, комбайн*

Актуальність. В більшості практично значимих випадках оптимальності режимів технічного контролю зернозбиральних комбайнів [1] може бути оцінена визначенням рішень двох задач:

- забезпечення нормативного рівня технічної готовності зернозбирального комбайна (тобто значення якого-небудь показника ремонтпридатності і безвідмовності) за мінімальних витрат трудових і

Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л.

затрат фінансових ресурсів на технічний контроль [2];

- забезпечення максимального з можливих рівня технічної готовності за обмежених витрат трудових і затрат фінансових ресурсів на технічний контроль (обернена задача оптимізації) [3].

Для найбільш складних і вартісних зернозбиральних комбайнів, відмова або зниження працездатності яких нижче допустимого рівня [4] може призвести до аварійних наслідків, показники безвідмовності і ремонтпридатності [5], як більш впливові характеристики, зазвичай розглядаються в якості обмеження, а фінансові затрати – як цільова функція оптимізації [6]. Тому в більшості випадків вирішується пряма задача оптимізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вирішення задач оптимізації режимів технічного контролю зернозбиральних комбайнів включає, як правило, побудову як моделей функціонування [7] і можна виділити ряд характерних груп потоків (переходів з одного стану в другий): виникнення відмов і несправностей [8], усунення відмов і несправностей [9], вивід комбайна на різні режими технічного контролю, вивід із стану проведення технічного контролю [10]. При цьому марковська апроксимація можлива, якщо випадкові потоки є простішими, тобто задовольняють умовам

ординарності, стаціонарності і відсутності наслідків [11]. В більшості задач прикладного характеру використання марковської апроксимації приводить до отримання рішень з похибкою в межах точності вихідних даних і, в більшості випадків, не перевищує 3-5% [12]. Тому використання властивостей марковських процесів для рішення практичних задач технічної готовності зернозбиральних комбайнів, як правило, є достатньо виправданим.

Мета дослідження. Наукове обґрунтування оптимальних режимів технічного контролю зернозбиральних комбайнів із забезпеченням нормативного рівня технічної готовності зернозбирального комбайна.

Завдання дослідження полягало у визначенні методу визначення оптимальної періодичності технічного контролю зернозбиральних комбайнів при заданих параметрах інтенсивностей відмов, трудомісткістю технічного контролю і відношення затрат при відмові до затрат на технічний контроль дозволяє мінімізувати значення величини сукупної оптимізаційної функції забезпечення технічної готовності комбайна і забезпечить оптимальне керування цим процесом.

Матеріали і методи дослідження. Так прийємо простіший випадок безперервно

Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л.

контрольованого параметру технічного стану зернозбиральних комбайнів в процесі експлуатації (рис. 1) можливі тільки два стани (працездатність і стан відмови) і при визначеній інтенсивності відмов λ

модель режимів технічного контролю включає тільки один керований параметр – середній час T_B або інтенсивність відновлення μ (при цьому $T_B = 1/\mu$).

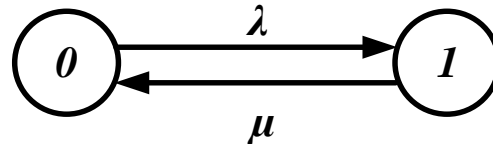


Рис. 1. Граф простішого випадку безперервно контрольованого параметру технічного стану зернозбиральних комбайнів в процесі експлуатації: 0 – працездатність, 1 – відмова

Для усталеного режиму експлуатації зернозбиральних комбайнів ($t \rightarrow \infty$) система диференційних рівнянь відносно

ймовірності стану комбайна $P_0(t)$ і $P_1(t)$ перетворюється в систему алгебраїчних рівнянь відносно граничних ймовірностей $P_0(t)$ і $P_1(t)$:

$$-\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \quad -\mu P_1 + \lambda P_0 = 0, \quad (1)$$

з якої (2.6), з врахуванням нормуючої умови $P_0 + P_1 = 1$, можливо отримати:

$$\mu = \lambda \frac{P_0}{1-P_0} = \lambda \frac{1-P_1}{P_1}. \quad (2)$$

При визначеній інтенсивності відмов комбайна λ і заданому рівні технічної готовності P_0 (ймовірність готовності комбайна до безвідмовної експлуатації) або ймовірності аварійної відмови $Q = P_1 = 1 - P_0$ (технічний ризик) можливо визначити граничне значення математичного очікування часу відновлення комбайна і, відповідно, інші значення режиму технічного контролю.

зернозбирального комбайна необхідно визначити деякі додаткові характеристики, які не можуть бути заданими виходячи з експериментальних досліджень або виробничої практики експлуатації комбайна. Для цього доцільно скористатись основними властивостями марковських процесів з безперервним часом.

В більш складних випадках для рішення задач оптимізації режимів технічного контролю

Так в моделі нерезервованої відмови зернозбирального комбайна з періодичним технічним контролем (рис. 2) можливі переходи чотирьох видів.

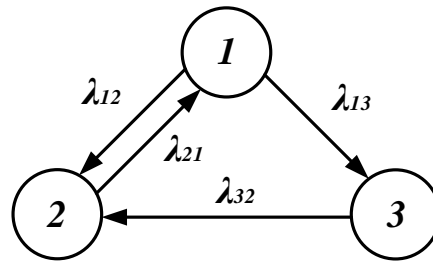


Рис. 2. Граф стану нерезервованої відмови зернозбирального комбайна з періодичним технічним контролем: 1 – працездатність; 2 – технічний контроль; 3 – нерезервована відмова (до проведення технічного контролю)

Перший вид (рис. 2). З працездатності (або стан технічної готовності комбайна до експлуатації) 1 в стані технічного контролю 2 з періодичністю t_{tc} і, відповідно, з інтенсивністю переходів $\lambda_{12} = 1/t_{tc}$.

Другий вид (рис. 2). Стан технічної готовності комбайна 1 в стані відмови 3 з інтенсивністю переходів, рівною інтенсивності відмов λ (або параметру потоку відмов): $\lambda_{13} = \lambda$.

Третій вид (рис. 2). Стан за режимом технічного контролю 2 в стані технічної готовності комбайна 1 з інтенсивністю, яка визначається тривалістю технічного контролю τ_{tc} : $\lambda_{21} = 1/\tau_{tc}$.

Четвертий вид (рис. 2). Стан за відмови комбайна 3 в стані за режимом технічного контролю 2 (перехід обумовлений віднайденням прихованої відмови при технічному контролі) з інтенсивністю λ_{32} .

Єдиним стан за повної працездатності комбайна є стан технічної готовності 1 і тому основним показником необхідно вважати ймовірність цього стану P_1 . При аналізі технічної готовності комбайна основним значенням є ймовірність відмови (технічний ризик) $Q = P_3$.

Результати дослідження та їх обговорення. Значення t_{tc} , λ , τ_{tc} і, відповідно, інтенсивність переходів λ_{12} , λ_{13} , λ_{21} можуть бути отримані за результатами експериментальних досліджень і випробувань або задаються регламентом технічного контролю комбайна і при побудові моделі їх можна вважати дійсними. Для віднайдення невідомих інтенсивностей λ_{32} можна скористатись властивостями марковських процесів з безперервним часом. Так як перехід 3-2 одиничний, то $p_{32} = 1$, і, очевидно, $t_3 = t_{tc} - t_{13}$, а $t_{13} = t_1$, тоді:

$$\lambda_{32} = p_{32}/t_3 = 1/t_3 = 1/(t_{tc} - t_{13}) = 1/(t_{tc} - t_1). \quad (3)$$

Крім того $\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{13} = \lambda + 1/t_{tc}$ і для простішого потоку відмов:

$$t_1 = \int_0^{\infty} [1 - F_1(t)] dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_1 t) dt = \int_0^{\infty} \exp[-(\lambda + 1/t_{tc})t] dt = \frac{1}{\lambda + 1/t_{tc}}. \quad (4)$$

Тоді,

$$t_3 = t_{tc} - t_1 = t_{tc} - \frac{1}{\lambda + 1/t_{tc}}, \quad (5)$$

і у відповідності до формули (5)

$$\lambda_{32} = \frac{1}{t_{tc} - \frac{1}{\lambda + 1/t_{tc}}} = \frac{1 + \lambda t_{tc}}{\lambda t_{tc}^2}. \quad (6)$$

Система диференціальних рівнянь для орієнтованого графа станів комбайна (рис. 2) має вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) = -(\lambda + 1/t_{tc})P_1(t) + P_2(t)/\tau_{tc} \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{32}P_3(t) = P_1(t)/t_{tc} - P_2(t)/\tau_{tc} + \left(\frac{1 + \lambda t_{tc}}{\lambda t_{tc}^2}\right)P_3(t). \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{32}P_3(t) = \lambda P_1(t) - \left(\frac{1 + \lambda t_{tc}}{\lambda t_{tc}^2}\right)P_3(t) \end{cases} \quad (7)$$

Так як система рівнянь (7) з рівнянь необхідно замінити лінійно залежна, то для рішення одне нормуючою умовою виду:

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1. \quad (8)$$

Крім того, необхідно задати початкові умови, $P_1(0) = 1$, $P_2(0) = P_3(0) = 0$.

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda + 1/t_{tc})P_1(t) + P_2(t)/\tau_{tc} \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = P_1(t)/t_{tc} - P_2(t)/\tau_{tc} + \left(\frac{1 + \lambda t_{tc}}{\lambda t_{tc}^2}\right)P_3(t). \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

Для вирішення системи диференціальних рівнянь (9) можна скористатись перетворенням Лапласа. Нехай $P_1(t)$ має зображення $P_1(x)$, тоді, у відповідності з властивостями диференціювання оригіналу, якщо $f(t)$, $f'(t)$, $f''(t)$,

..., $f^{(n)}(t)$ – оригінали і його похідні, і $f(t) \xrightarrow{L} F(t)$, тоді $f'(t) \xrightarrow{L} xF(t) - f(0)$, $f^{(n)}(t) \xrightarrow{L} x^{(n)}F(t) - x^{(n-1)}f(0) - K - x^{(n-2)}f(0) - x^{(n-1)}f(0)$.

$$\frac{dP_1(t)}{dt} \xrightarrow{L} xP_1(x) - P_1(0). \quad (10)$$

Застосувавши перетворення задаючись початковими умовами, $t = 0$, $P_1(0) = 1$, $P_2(0) = P_3(0) = 0$ і

Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л.

враховуючи,

ЩО

 $1 \xrightarrow{L} 1/x$, система (2.14) приймає вид:

$$\begin{cases} xP_1(x) - 1 + (\lambda + 1/t_{tc})P_1(x) - P_2(x)/\tau_{tc} = 0 \\ xP_2(x) - P_1(x)/t_{tc} + \tau_{tc}P_2(x) - \left(\frac{1+\lambda t_{tc}}{\lambda t_{tc}^2}\right)P_3(x) = 0, \\ P_1(x) + P_2(x) + P_3(x) - 1/x = 0 \end{cases} \quad (11)$$

або, виконавши перехід до інтенсивності переходів:

$$\begin{cases} xP_1(x) - 1 + (\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1(x) - \lambda_{21}P_2(x) = 0 \\ xP_2(x) - \lambda_{12}P_1(x) + \lambda_{21}P_2(x) - \lambda_{32}P_3(x) = 0, \\ P_1(x) + P_2(x) + P_3(x) - 1/x = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Надалі представлено рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь (12):

$$P_1(x) = \frac{\lambda_{32}x + x^2 + \lambda_{21}x + \lambda_{32}\lambda_{21}}{x(\lambda_{32}x + \lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{32}\lambda_{13} + x^2 + \lambda_{12}x + \lambda_{13}x + \lambda_{21}x + \lambda_{21}\lambda_{13} + \lambda_{32}\lambda_{21})}. \quad (13)$$

$$P_2(x) = \frac{\lambda_{12}x + \lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{32}\lambda_{13}}{x(\lambda_{32}x + \lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{32}\lambda_{13} + x^2 + \lambda_{12}x + \lambda_{13}x + \lambda_{21}x + \lambda_{21}\lambda_{13} + \lambda_{32}\lambda_{21})}. \quad (14)$$

$$P_3(x) = \frac{x + \lambda_{21}}{x(\lambda_{32}x + \lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{32}\lambda_{13} + x^2 + \lambda_{12}x + \lambda_{13}x + \lambda_{21}x + \lambda_{21}\lambda_{13} + \lambda_{32}\lambda_{21})}. \quad (15)$$

Для віднайдення шуканих розрив функцій $P_1(x)$, $P_2(x)$, $P_3(x)$. ймовірностей $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ Крім того, частина полінома необхідно виконати обернене знаменника (в скобках), що перетворення Лапласа. Однак залишилась, має другу степінь і, поліном в знаменнику формул (13), відповідно, має ще дві точки розриву (14) і (15) при $x_1 = 0$ відбувається (полюси):

$$x_2 = -\frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} - \\ - \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - \right. \\ \left. - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \end{array} \right]. \quad (16)$$

$$x_3 = -\frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - \right. \\ \left. - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \end{array} \right]. \quad (17)$$

Для усунення даної проблеми – правильні раціональні дроби, то використовуємо метод теорії ймовірності визначаємо як суму вираховань. Так як $P_1(x)$, $P_2(x)$, $P_3(x)$ вираховань в полюсах:

$$P_1(t) = \int_{k=1}^3 \operatorname{Re} s [P_1(x) \exp(xt)]_{x_k}, \quad (18)$$

$$P_2(t) = \int_{k=1}^3 \operatorname{Re} s [P_2(x) \exp(xt)]_{x_k}, \quad (19)$$

$$P_3(t) = \int_{k=1}^3 \operatorname{Re} s [P_3(x) \exp(xt)]_{x_k}, \quad (20)$$

де $\operatorname{Re} s [P_1(x) \exp(xt)]_{x_k} = \lim_{x \rightarrow x_k} [P_1(x) \exp(xt)(x - x_k)]$,

Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л.

$$\operatorname{Res}_{x_k} [P_2(x) \exp(xt)] = \lim_{x \rightarrow x_k} [P_2(x) \exp(xt)(x - x_k)],$$

$$\operatorname{Res}_{x_k} [P_3(x) \exp(xt)] = \lim_{x \rightarrow x_k} [P_3(x) \exp(xt)(x - x_k)],$$

де k – кількість полюсів (точок розриву).

Після перетворень за ймовірність стану зернозбирального комбайну при різних поєднаннях залежностями (18), (19), (20) із заданих значень періодичності і застосуванням пакети прикладних програм Solve System of Equations MathCad 15 отримано аналітичну модель, які дозволяють визначити та інтенсивності відмов.

$$P_1(t) = \begin{bmatrix} \lambda_{13}^2 + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 - \lambda_{32}\lambda_{13} - \lambda_{32}\lambda_{12} - \lambda_{21}\lambda_{13} + \lambda_{21}\lambda_{12} - \\ -\lambda_{13} \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \\ -\lambda_{12} \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} -\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{bmatrix}^{-1} \times \\ \times \exp \left\{ \frac{1}{2} t \left[-\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \right] \right\} + \\ + \begin{bmatrix} \lambda_{13}^2 + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + (\lambda_{13} + \lambda_{12}) \times \\ \times \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \\ - (\lambda_{32}(\lambda_{13} + \lambda_{12}) + \lambda_{21}(\lambda_{13} - \lambda_{12})) \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{bmatrix}^{-1} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} t \left[\lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \right] \right\} - \\ - 4\lambda_{32}\lambda_{21} \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\left\{ + \left(\begin{array}{c} -\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + \\ \lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \\ + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \end{array} \right)^{1/2} \right\} \times \right]^{-1} \\
& \times \left[\left\{ + \left(\begin{array}{c} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + \\ \lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \\ + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \end{array} \right)^{1/2} \right\} \right]^{-1} \quad (21) \\
P_2(t) = & \left[\begin{array}{c} -\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 - \lambda_{12} \times \\ \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right)^{1/2} \\ + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \\ - 2\lambda_{32}\lambda_{13} \end{array} \right] \times \\
& \times \left[\begin{array}{c} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + \\ \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right)^{1/2} \\ + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \end{array} \right]^{-1} \times \\
& \times \exp \left\{ -\frac{1}{2}t \left[\begin{array}{c} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} - \\ \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right)^{1/2} \\ + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \end{array} \right] \right\} + \\
& + \left[\begin{array}{c} \lambda_{32}\lambda_{12} - \lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}\lambda_{12} - \lambda_{12}^2 - \lambda_{12} \times \\ \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right)^{1/2} \\ + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \\ + 2\lambda_{32}\lambda_{13} \end{array} \right] \times \\
& \times \left[\begin{array}{c} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + \\ \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right)^{1/2} \\ + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \end{array} \right]^{-1} \times \\
& \times \exp \left\{ -\frac{1}{2}t \left[\begin{array}{c} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} - \\ \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right)^{1/2} \\ + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \end{array} \right] \right\} - \\
& - 4\lambda_{32}(\lambda_{12} + \lambda_{13}) \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\left\{ \begin{array}{c} -\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{array} \right\} \times \right]^{-1} \\
& \times \left[\left\{ \begin{array}{c} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{array} \right\} \right]^{-1} \quad (22) \\
P_3(t) = & \left[\begin{array}{c} -\lambda_{32} - \lambda_{13} + \lambda_{21} - \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{array} \right] \times \\
& \times \left[\begin{array}{c} -\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{array} \right]^{-1} \times \\
& \times \lambda_{13} \exp \left\{ \frac{1}{2} t \left[\begin{array}{c} -\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - \right. \\ \left. - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{array} \right] \right\} - \\
& - \left[\begin{array}{c} \lambda_{32} - \lambda_{13} + \lambda_{21} - \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{array} \right] \times \\
& \times \left[\begin{array}{c} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{array} \right]^{-1} \times \\
& \times \lambda_{13} \exp \left\{ -\frac{1}{2} t \left[\begin{array}{c} -\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - \right. \\ \left. - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{array} \right] \right\} - \\
& - 4\lambda_{32}\lambda_{21} \times
\end{aligned}$$

$$\times \left[\left\{ \begin{array}{c} -\lambda_{32} - \lambda_{13} - \lambda_{21} - \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{array} \right\} \times \right]^{-1} \quad (23)$$

$$\times \left[\left\{ \begin{array}{c} \lambda_{32} + \lambda_{13} + \lambda_{21} + \lambda_{12} + \\ + \left(\lambda_{32}^2 - 2\lambda_{32}\lambda_{13} - 2\lambda_{32}\lambda_{21} - 2\lambda_{32}\lambda_{12} + \lambda_{13}^2 - 2\lambda_{21}\lambda_{13} + \right. \\ \left. + 2\lambda_{13}\lambda_{12} + \lambda_{21}^2 + 2\lambda_{21}\lambda_{12} + \lambda_{12}^2 \right)^{1/2} \end{array} \right\} \right]$$

Результати аналітичних визначень за формулами (21), (22) і (23) дозволяють констатувати, що ймовірність стану технічної готовності зернозбирального комбайна і, відповідно, технічні відмови визначаються, в першу чергу,

інтенсивністю відмов комбайна (таблиця 1) і періодичністю технічного контролю (рис. 3,а), в незначній мірі залежить від тривалості технічного контролю (рис. 3,б).

1. Ймовірність стану технічної готовності комбайна ($\tau_{tc} = 10$ год)

t_{tc} , діб	λ , год ⁻¹	Термін експлуатації t , років						Фінальна ймовірність
		0,1	0,5	1	2	5	10	
0,5	10^{-4}	0,9358	0,8826	0,8798	0,8797	0,8797	0,8797	0,8797
	10^{-5}	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958	0,9958
	10^{-6}	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977
1	10^{-4}	0,9232	0,7728	0,7228	0,7093	0,7086	0,7086	0,7086
	10^{-5}	0,9938	0,9918	0,9918	0,9918	0,9918	0,9918	0,9918
	10^{-6}	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
2	10^{-4}	0,9187	0,7020	0,5724	0,4914	0,4734	0,4724	0,4724
	10^{-5}	0,9920	0,9785	0,9747	0,9739	0,9739	0,9739	0,9739
	10^{-6}	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991

Крім того, результати обрахунків дозволяють констатувати про тривалість перехідних процесів, протягом яких ймовірність стану технічної готовності комбайна знижується до нормативної фінальної ймовірності, і, відповідно, про

можливість застосування для визначення стаціонарної моделі. Так, наприклад, при $\lambda = 10^{-4}$, год⁻¹ і $t_{tc} = 2$ доби після 3 років експлуатації значення P_1 практично не змінюється (рис. 3).

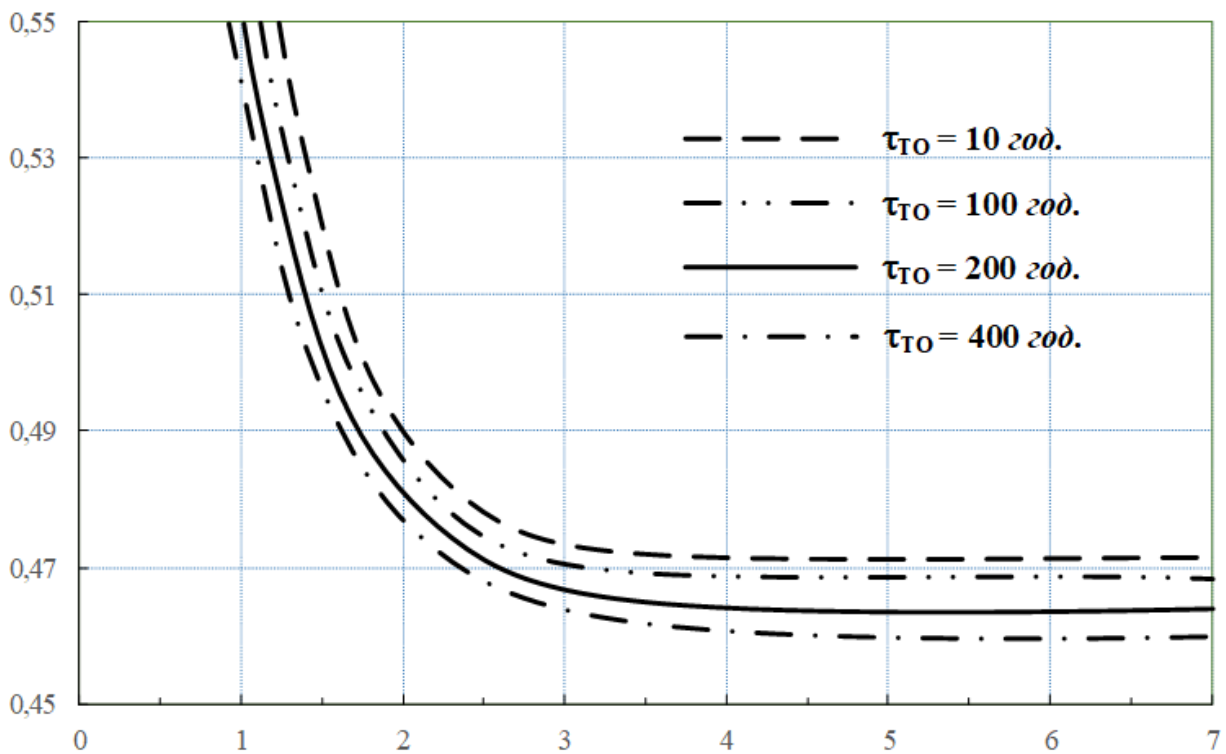
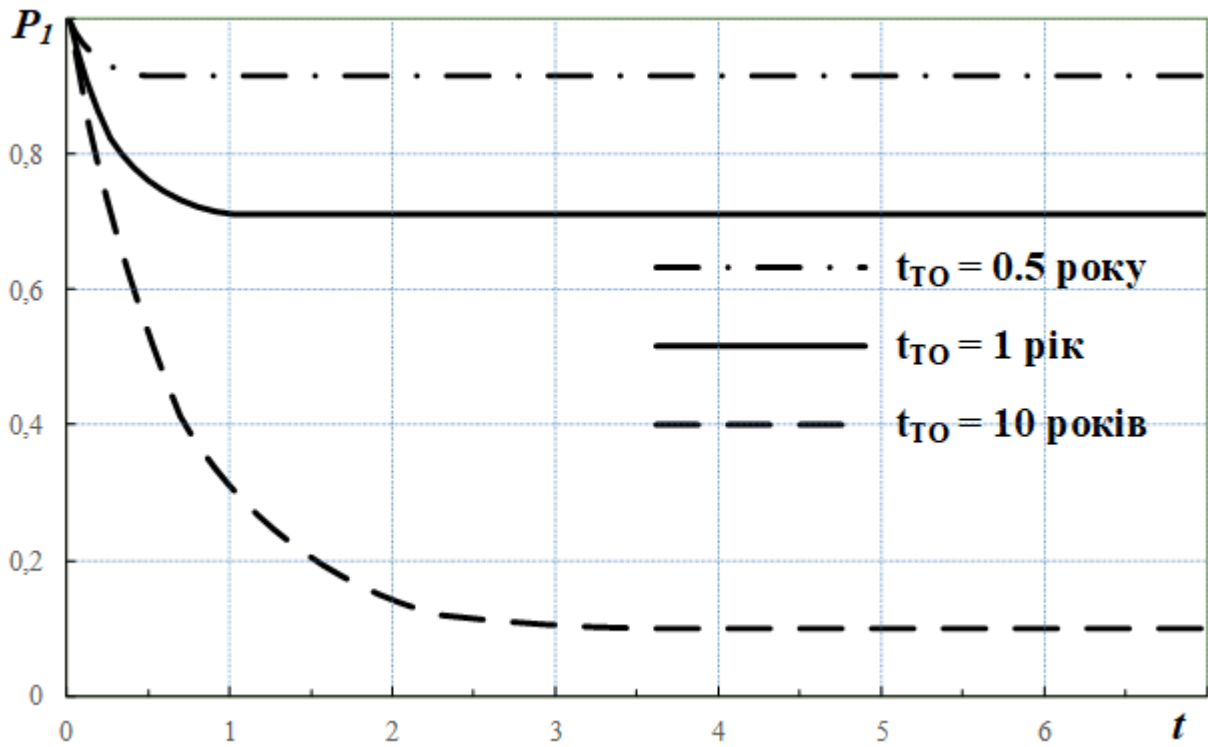


Рис. 3. Залежність ймовірності технічного стану зернозбирального комбайна від терміну експлуатації.

Для усталеного режиму експлуатації $dP_1/dt = 0$, $dP_2/dt = 0$, $dP_3/dt = 0$ і система диференціальних рівнянь (6) набуде свого перетворення в систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1 + \lambda_{21}P_2 = -(t_{tk}^{-1} + \lambda)P_1 + \tau_{tk}^{-1}P_2 = 0 \\ \lambda_{12}P_1 - \lambda_{21}P_2 + \lambda_{32}P_3 = t_{tk}^{-1}P_1 - \tau_{tk}^{-1}P_2 + [t_{tk} - (t_{tk}^{-1} + \lambda)^{-1}]^{-1}P_3 = 0, \\ \lambda_{13}P_1 - \lambda_{32}P_3 = \lambda P_1 - [t_{tk} - (t_{tk}^{-1} + \lambda)^{-1}]^{-1}P_3 = 0 \end{cases} \quad (24)$$

При доповненні системи (24) ймовірностей стану можна отримати нормуючою умовою $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ у виді:

$$P_1 = \frac{t_{tk}(1+t_{tk}\lambda)}{\lambda^2 t_{tk}^2 \tau_{tk} + \tau_{tk} + 2\lambda t_{tk} \tau_{tk} + \lambda^2 t_{tk}^3 + t_{tk} + \lambda t_{tk}^2}, \quad (25)$$

$$P_2 = \frac{t_{tk}(2\lambda t_{tk} + \lambda^2 t_{tk}^2 + 1)}{\lambda^2 t_{tk}^2 \tau_{tk} + \tau_{tk} + 2\lambda t_{tk} \tau_{tk} + \lambda^2 t_{tk}^3 + t_{tk} + \lambda t_{tk}^2}, \quad (26)$$

$$P_3 = \frac{\lambda^2 t_{tk}^3}{\lambda^2 t_{tk}^2 \tau_{tk} + \tau_{tk} + 2\lambda t_{tk} \tau_{tk} + \lambda^2 t_{tk}^3 + t_{tk} + \lambda t_{tk}^2}, \quad (27)$$

Фінальні ймовірності P_1 за формулою (24) представлені в табл. 1, де-які за формулами (25), (26), (27) графічно представлені на рис. 4, як залежність ймовірності стану технічної готовності комбайна P_1 від періодичності технічного контролю t_{tk} , при різних поєднаннях значень інтенсивності відмов λ і тривалості технічного контролю τ_{tk} . А на рис. 5 графічна інтерпретація залежності ймовірності стану комбайна в непрацездатному стані від періодичності технічного контролю. Необхідно відзначити наявний екстремум (максимум), тобто при заданих значеннях λ і τ_{tk} існує оптимальна періодичність технічного контролю і, відповідно, граничне максимальне значення ймовірності стану технічної готовності комбайна.

Отримані математичні моделі (21), (22), (23) для неусталеного і (25), (26), (27) усталеного режимів експлуатації комбайна дають можливість визначити оптимізацію процесу технічної готовності.

Значна кількість технічних систем, а саме механізмів, вузлів і агрегатів зернозбиральних комбайнів, з метою підвищення безвідмовності мають дубльовану схему основних робочих органів, а робота систем керування параметрами технічного стану формуються за мажоритарною схемою. Наприклад, в моделі комбайна з резервованими системами з періодичним технічним контролем параметрів технічного стану кількість станів складає шість і, відповідно, можливі переходи восьми видів (рис. б).

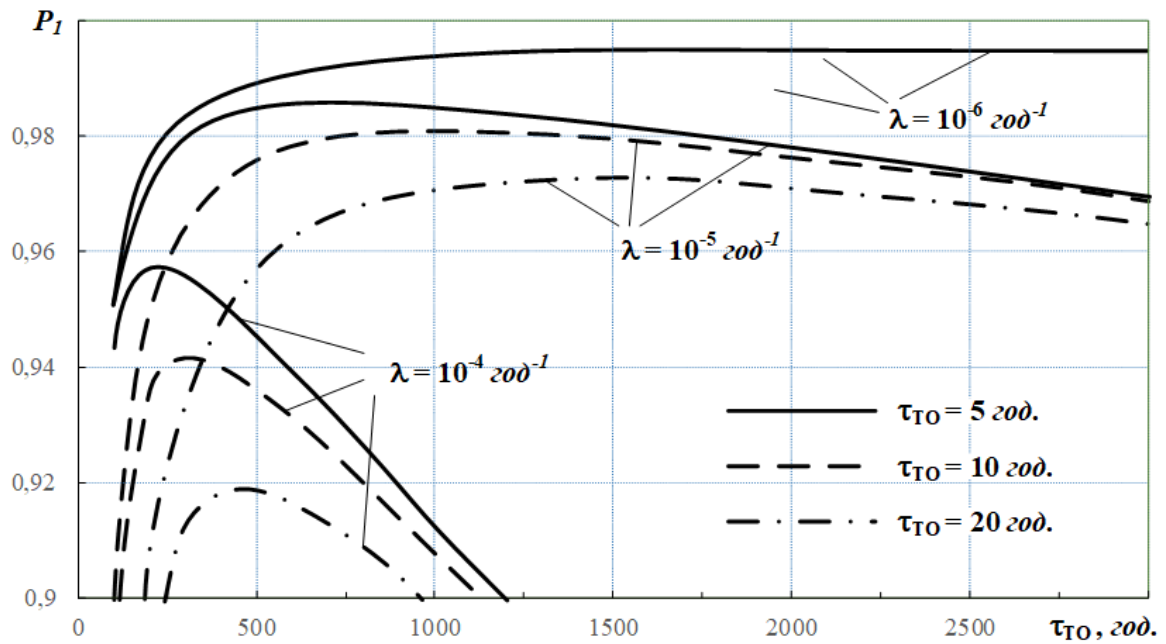


Рис. 4. Залежність ймовірності стану технічної готовності від періодичності технічного контролю комбайна

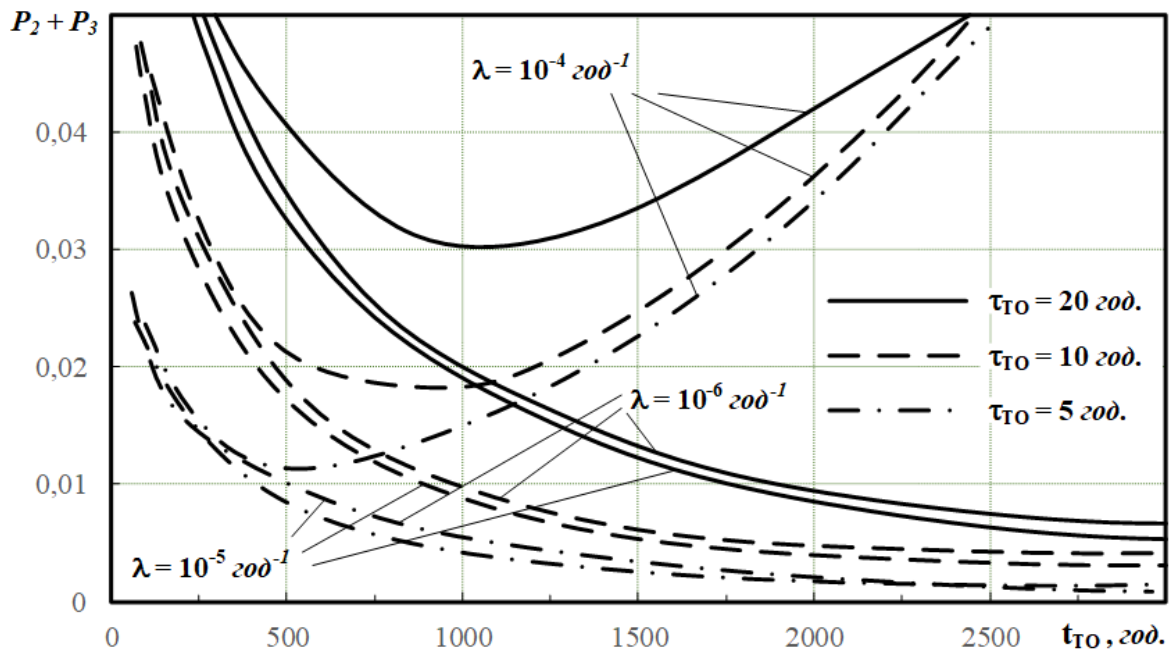


Рис. 5. Залежність ймовірності непрацездатного стану комбайна від періодичності його технічного контролю

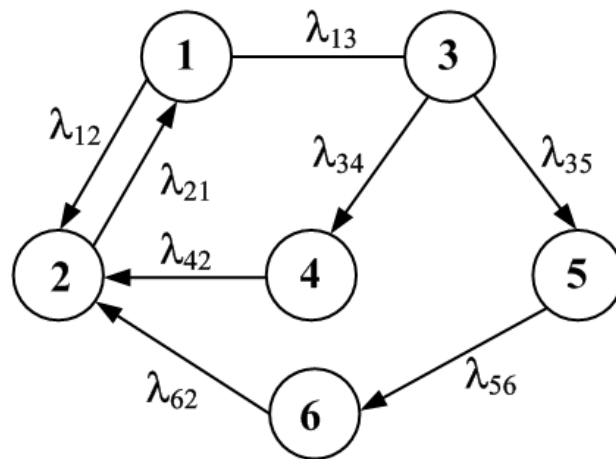


Рис. 6. Граф станів комбайна з резервованими системами з періодичним технічним контролем параметрів технічного стану: 1 – працездатний стан (готовність до експлуатації) основної і резервної систем; 2 – періодичність технічного контролю при двох працездатних системах; 3 – працездатний стан (готовність до експлуатації) однієї із систем; 4 – періодичний технічний контроль при одній працездатній системі комбайна; 5 – неявна відмова обох систем; 6 – періодичний технічний контроль при двох відмовивших системах і усуненні відмов.

Необхідно відмітити, що граф станів (рис. 6), передбачає необхідність зниження технічної готовності комбайна навіть при усуненні відмови одного каналу (перехід 4-2). Якщо для періодичного технічного контролю комбайни виводяться із працездатного стану (стану технічної готовності), тобто вимикаються, тоді працездатним є тільки стани 1 і 3 (технічної готовності до експлуатації двох і однієї системи, відповідно) і тому основним показником технічного готовності можна вважати сумарну ймовірності $P_{1-3} = P_1 + P_3$. Якщо ж технічний контроль здійснюється без вимикань, тоді працездатними є стани 1, 2, 3 і 4 (рис. 6) та основним

показником безвідмовності є сумарна ймовірності $P_{1-4} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$.

Інтенсивність відмов комбайнів λ , періодичність технічного контролю t_{tk} , математичне очікування трудомісткості технічного контролю τ_{tk} і усунення відмов τ_f і, відповідно, інтенсивності переходів $\lambda_{12} = 1/t_{tk}$, $\lambda_{13} = 2\lambda$, $\lambda_{21} = 1/\tau_{tk}$, $\lambda_{35} = \lambda$, $\lambda_{42} = \lambda_{62} = 1/(\tau_{tk} + \tau_f)$ можуть бути отримані за результатами експериментальних досліджень або задаються регламентом. Для знаходження інтенсивностей переходів λ_{34} і λ_{56} можна використати властивості марковських процесів з безперервним часом:

$$\lambda_{34} = \left[t_{tk} - \left(2\lambda + \frac{1}{t_{tk}} \right)^{-1} \right]^{-1} \left[\lambda \left\{ t_{tk} - \left(2\lambda + \frac{1}{t_{tk}} \right)^{-1} \right\} \right]^{-1} = \frac{(1+2\lambda t_{tk})^2}{\lambda t_{tk}^2 \{1+(1+2\lambda t_{tk})^2\}} \quad (28)$$

$$\lambda_{56} = \left[-\frac{t_{tk}}{2} + \left(2\lambda + \frac{1}{t_{tk}} \right)^{-1} \right]^{-1} = \frac{2(1+2\lambda t_{tk})}{t_{tk}(1-2\lambda t_{tk})} \quad (29)$$

Система диференціальних рівнянь має вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{42}P_4(t) + \lambda_{62}P_6(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{13}P_1(t) - (\lambda_{34} + \lambda_{35})P_3(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{42}P_4(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_{35}P_3(t) - \lambda_{56}P_5(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_{56}P_5(t) - \lambda_{62}P_6(t) \end{array} \right. \quad (30)$$

Систему рівнянь (30) необхідно доповнити нормуючою умовою виду: $P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) +$

$P_5(t) + P_6(t) = 1$ і початковими умовами, $P_1(0) = 1, P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = P_6(0) = 0$.

2. Ймовірність стану технічної готовності комбайна $P_{1,3}$ при $t_{tk} = 6$ міс., $\tau_{tk} = 3$ год, $\tau_f = 10$ год

$\lambda, \text{год}^{-1}$	Термін експлуатації t , років			
	0,5	1	2	3
10^{-4}	0,949444	0,947142	0,945093	0,943068
10^{-5}	0,998882	0,998882	0,998841	0,998838
10^{-6}	0,999278	0,999272	0,999264	0,999256

Чисельний аналіз системи диференціальних рівнянь (30) в інтервалах значень основних параметрів $\lambda = 10^{-4} \div 10^{-6} \text{ год}^{-1}$, $t_{tk} = 12 \div 120 \text{ год}$, $\tau_{tk} = 0,3 \div 3 \text{ год}$, і $\tau_f = 1 \div 10 \text{ год}$ показує, що при $\lambda \leq 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ перехідні процеси в моделі практично відсутні (табл. 2).

Висновки і перспективи. Запропонований метод і результат

визначення оптимальної періодичності технічного контролю зернозбиральних комбайнів при заданих параметрах інтенсивностей відмов, трудомісткістю технічного контролю і відношення збитків (затрат) при відмові до затрат на технічний контроль дозволяє мінімізувати значення величини сукупної оптимізаційної функції S_{min} забезпечення технічного готовності

Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л.

комбайна і забезпечить оптимальне керування цим процесом.

Список використаних джерел

1. Sergejeva N., Aboltins A., Strupule L., Aboltina B. Mathematical knowledge in elementary school and for future engineers. Proceedings of 17th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 23-25, 2018, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 17, pp. 1166-1172.

2. Dubbini M., Pezzuolo A., De Giglio M., Gattelli M., Curzio L., Covi D., Yezekyan T., Marinello F. Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. CIGR Journal, vol. 19, 2017, pp. 158-163.

3. Yata V.K., Tiwari B.C., Ahmad, I. Nanoscience in food and agriculture: research, industries and patents. Environmental Chemistry Letters, vol. 16, 2018, pp. 79-84.

4. Masek J., Novak P., Jasinskas A. Evaluation of combine harvester operation costs in different working conditions. Proceedings of 16th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 24-26, 2017, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16, pp. 1180-1185.

5. Rogovskii I., Grubrin O. Accuracy of converting videoendoscopy combine harvester using generalized mathematical model. Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: technique and energy of АПК. Kyiv, Ukraine. vol. 298, 2018, pp. 149-156. doi: 10.31548/me.2018.04.149-156.

6. Viba J., Lavendelis E. Algorithm of synthesis of strongly non-linear mechanical systems. In Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME, 22 April 2006. Tallinn, Estonia, pp. 95-98.

7. Luo A.C.J., Guo Y. Vibro-impact Dynamics. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 213 p.

8. Astashev V., Krupenin V. Efficiency of vibration machines. Proceedings of 16th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 24-26, 2017, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16, pp. 108-113.

9. Zagurskiy O., Ohienko M., Rogach S., Pokusa T., Titova L., Rogovskii I. Global supply chain in context of new model of economic growth. Conceptual bases and trends for development of social-economic processes. Monograph. Opole. Poland, 2018, pp. 64-74.

10. Drga R., Janacova D., Charvatova H. Simulation of the PIR detector active function. Proceedings of 20th International conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2016), July 14-17, 2016, E D P Sciences, 17 Ave Du Hoggar Parc D Activites Coutaboeuf Bp 112, F-91944 Cedex A, France, vol. 76, UNSP 04036.

11. Novotny J. Technical and natural sciences teaching at engineering faculty of FPTM UJEP. Proceedings of 15th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 23-25, 2016, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 15, pp. 16-20.

12. Pinzi S., Cubero-Atienza A.J., Dorado M.P. Vibro-acoustic analysis procedures for the evaluation of the sound insulation characteristics of agricultural machinery. Journal of Sound and Vibration, vol. 266 (3), 2016, pp. 407-441.

References

1. Sergejeva N., Aboltins A., Strupule L., Aboltina B. (2018). Mathematical knowledge in elementary school and for future engineers. Proceedings of 17th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 23-25, 2018, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 17, 1166-1172.

2. Dubbini M., Pezzuolo A., De Giglio M., Gattelli M., Curzio L., Covi D., Yezekyan T., Marinello F. (2017). Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. CIGR Journal, vol. 19, 158-163.

3. Yata V.K., Tiwari B.C., Ahmad, I. (2018). Nanoscience in food and agriculture: research, industries and patents. Environmental Chemistry Letters, vol. 16, 79-84.

4. Masek J., Novak P., Jasinskas A. (2017). Evaluation of combine harvester operation costs in different working conditions.

Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л.

Proceedings of 16th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 24-26, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16, 1180-1185.

5. Rogovskii I., Grubrin O. (2018). Accuracy of converting videoendoscopy combine harvester using generalized mathematical model. Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: technique and energy of APK. Kyiv, Ukraine. vol. 298, 149-156. doi: 10.31548/me.2018.04.149-156.

6. Viba J., Lavendelis E. (2006). Algorithm of synthesis of strongly non-linear mechanical systems. In Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME, 22 April 2006. Tallinn, Estonia, 95-98.

7. Luo A.C.J., Guo Y. (2013). Vibro-impact Dynamics. Berlin: Springer-Verlag. 213.

8. Astashev V., Krupenin V. (2017). Efficiency of vibration machines. Proceedings of 16th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 24-26, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16, 108-113.

9. Zagurskiy O., Ohiienko M., Rogach S., Pokusa T., Titova L., Rogovskii I. (2018).

Global supply chain in context of new model of economic growth. Conceptual bases and trends for development of social-economic processes. Monograph. Opole. Poland, 64-74.

10. Drga R., Janacova D., Charvatova H. (2016). Simulation of the PIR detector active function. Proceedings of 20th International conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2016), July 14-17, 2016, E D P Sciences, 17 Ave Du Hoggar Parc D Activites Coutaboef Bp 112, F-91944 Cedex A, France, vol. 76, UNSP 04036.

11. Novotny J. (2016). Technical and natural sciences teaching at engineering faculty of FPTM UJEP. Proceedings of 15th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 23-25, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 15, 16-20.

12. Pinzi S., Cubero-Atienza A.J., Dorado M.P. (2016). Vibro-acoustic analysis procedures for the evaluation of the sound insulation characteristics of agricultural machinery. Journal of Sound and Vibration, vol. 266 (3), 407-441.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕЖИМОВ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

Д. Ю. Калиниченко, И. Л. Роговский

Аннотация. В зависимости от постановки задачи оптимизации возможны различные варианты ее решения, в том числе такие, которые предполагают изменения не только параметров технического состояния зерноуборочных комбайнов, но и структуры самого режима технического контроля, в части разработки и использования различных комбинаторных и комплексных моделей с различными видами технического контроля, за фактическим техническим состоянием, что может быть связано с необходимостью его непрерывного или периодического технического контроля.

Наряду с критерием предельного допустимой вероятности отказа для определения продолжительности эксплуатации комбайна между поочередными техническими контролями используются также экономико-математические критерии. При этом требования к технической готовности комбайна выполняют роль ограничения. Тогда задача управления технической готовностью зерноуборочного комбайна при эксплуатации может быть

Калініченко Д. Ю., Роговський І. Л.

формализована с общеизвестным принципом, который представляет собой алгебраическую сумму произведения всех возможных вероятностей потери трудоспособности и ущерб от простоев комбайна из этих событий. Доказана целесообразность применения метода определения оптимальной периодичности технического контроля зерноуборочных комбайнов при заданных параметрах интенсивности отказов, трудоемкостью технического контроля и отношение затрат при отказе от затрат на технический контроль позволяет минимизировать значение величины совокупной оптимизационной функции обеспечения технической готовности комбайна и обеспечит оптимальное управление этим процессом.

Ключевые слова: модель, стохастичность, адекватность, оптимизация, режим, контроль, комбайн

ANALYTICAL MODEL OF MODES TECHNICAL CONTROL OF GRAINHARVESTER COMBINES

D. Yu. Kalinichenko, I. L. Rogovskii

Abstract. Depending on the optimization problem of the various possible solutions, including those that involve changes not only the parameters of the technical state of the combine harvesters, but also the structure of the regime of technical control, development and use of various combinatorial and complex models with different types of technical control over the actual technical condition that can be related to the need for its continuous or periodic technical inspection.

Along with the criterion of maximum allowable failure probability to determine the duration of operation of the processor between successive technical controls are also used mathematical criteria. The requirements for technical readiness of the combine perform the role of the constraints. Then the task management of the technical readiness of the combine harvester during operation can be formalized with the well-known principle, which is the algebraic sum of works of all possible probabilities of disability, and the damage from the downtime of the processor of these events. The article proves expediency of application of the method of determining the optimal frequency of technical control of combine harvesters for specified failure rate, complexity of technical control and the ratio of costs in case of refusal in maintenance control allows to minimize the value of the aggregate of the optimization functions to ensure the technical readiness of the processor and ensure optimum management of this process.

Key words: model, stochasticity, adequacy, optimization, mode, control, combine