

АЛГОРИТМІЧНІСТЬ СЕЗОННОЇ БЕЗВІДМОВНОСТІ ГІДРОСИСТЕМ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

Задорожнюк Дмитро Володимирович

аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-3869-7213

dimitrio380@gmail.com

В статті сформульовані методичні підходи оптимізації щодо підвищення оперативної готовності парку та збільшення сезонного виробітку за рахунок оптимального розподілу робіт між групами зернозбиральних комбайнів.

Авторами розроблена методика оптимізації сезонного навантаження ресурсних груп зернозбиральних комбайнів технологічного комплексу з урахуванням їх технічного стану та умов експлуатації. При цьому процес машиновикористання зернозбирального комбайна розглядається у вигляді особливості експлуатації зернозбиральних комбайнів, як такої, що вони використовуються для обмеженої кількості сільськогосподарських операцій протягом обмеженого агротехнічного терміну. На підставі аналізу зміни вартості підтримки гідросистем комбайна у працездатному стані, автором виділено межі ресурсних груп, основними критеріями яких стали досягнуті показники надійності при наявному напрацюванні гідросистем, обсяг ремонтних впливів планово-попереджувальної системи обслуговування, прогнозоване сезонне напрацювання, а також вартість усунення наслідків відмов гідросистем комбайна. Також важливим фактором при розрахунку складу парку зернозбиральних комбайнів та плануванні його сезонного навантаження обґрунтовано ринкову вартість комбайнів для кожної із ресурсних груп, зниження якої також відбувається нелінійно. Оптимізація напрацювання гідросистем комбайна полягає у визначенні меж ресурсних груп, зниженні напрацювання за межами зниження коефіцієнта оперативної готовності, що призводить до простою комбайнів та втрат у результаті порушення агротехнічних термінів. Так як сезонна експлуатація зернозбиральних комбайнів складається з декількох етапів збирання різних культур або їх сортів, що мають різні терміни дозрівання.

В статті отримано залежність зростання експлуатаційних витрат при усуненні наслідків відмов у міру їх виникнення та за планово-попереджувальної системи технічного контролю і ремонту та визначення меж ресурсних груп залежно від напрацювання. Обґрунтовано алгоритм оптимізації сезонного навантаження парку зернозбиральних комбайнів. Представлено результати порівняння середнього навантаження на один комбайн по країні та напрацювання по обстежуваному парку зернозбиральних комбайнів.

Отримані результати, як перспектива подальших досліджень, можуть бути використані аграрними господарствами при комплектуванні комбайнового машинного парку як вітчизняними так і імпортованими моделями зернозбиральних комбайнів.

Ключові слова: алгоритм, зернозбиральний комбайн, безвідмовність, втрати урожаю, критерій.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.5>

Постановка проблеми. Стан парку зернозбиральних комбайнів та їхня неефективна експлуатація стали однією з основних причин зниження валового збору врожаю (Rejovitzky & Altus, 2013) та рентабельності виробництва зернових культур (Nazarenko et al., 2020). Більше половини товаровиробників використовують у своїй діяльності спрощені технології та зношену техніку (Tyutrin, 2019). В умовах зниження чисельного складу (Li et al., 2017) та морального зносу парку зернозбиральних комбайнів у сільському господарстві особливо актуальним стає завдання підвищення ефективності їх використання (Нукуфорчун et al., 2019). Особливої актуальності це завдання набуває для машиновикористання та спеціалізованих збирально-транспортних комплексів (Miu, 2016), які надають послуги зі збирання зерна на площах із досить великими площами переїздів (Caffaro et al., 2020). У зв'язку з тим, що зернозбиральні комбайни використовуються протягом в обмежений період сезону експлуатації з високою інтенсивністю (Guansah & Ansa, 2020), необхідно знайти нові методи підвищення ефективності їх експлуатації (Kuzmich et al., 2021).

У цих умовах зростають вимоги до зернозбиральної техніки щодо підвищення оперативної готовності парку

(Mozharivskiy et al., 2022) та збільшення сезонного виробітку за рахунок оптимального розподілу робіт між групами комбайнів (Najafi et al., 2015). Вирішення даної задачі дозволить знизити експлуатаційні витрати при виконанні збиральних робіт і зменшити простої високопродуктивних машин (Huang, 2015), пов'язаних із усуненням відмов і призводять до затягування агротехнічних термінів, що дозволить знизити втрати врожаю (Yezeqyan et al., 2020).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх двох десятиліть спостерігається постійне зниження кількісного складу парку зернозбиральних комбайнів (Rogovskii et al., 2019). Незважаючи на одночасне зниження посівних площ, зменшення парку йде інтенсивніше (Kavka et al., 2016), що призводить до підвищення навантаження на одиницю техніки (Romaniuk et al., 2018). В умовах, що склалися, особливо актуальною стає проблема ефективного використання існуючого парку зернозбиральних комбайнів (Xu et al., 2019).

Аналіз розподілу витрат на утримання та експлуатацію сучасних зернозбиральних комбайнів показує, що, незважаючи на підвищення продуктивності та енергонасиченості, спостерігається збільшення питомих витрат

на збирання сільськогосподарської продукції, зумовлене підвищеними амортизаційними відрахуваннями через високу початкову вартість машин, особливо імпортного виробництва. Крім цього при виконанні збиральних робіт в умовах великих агрофірм значні холості переїзди машин по дільницях (Matindi et al., 2018), на який збирають урожай (Hrynkiv et al., 2020), що істотно збільшує знос систем трансмісії (Voinalovych et al., 2019). Необхідність збільшення сезонного напрацювання комбайнів призводить до зниження показників надійності (Kurpris et al., 2016), що збільшує простої на усунення наслідків відмов та призводить до збільшення біологічних втрат урожаю, спричинених порушенням агротехнічних термінів (Pöhlitz et al., 2018).

Розглянуті аспекти дозволяють стверджувати (Gurcanli et al., 2015), що одним із шляхів підвищення ефективності експлуатації парку зернозбиральних комбайнів може стати зміна підходу до передсезонної підготовки машин для забезпечення безвідмовної роботи (Aven, 2016), комплектування парку зернозбиральних комбайнів на основі виділених ресурсних груп (Rogovskii, 2019), планування та розподіл їх сезонного навантаження між ресурсними групами (Nazarenko et al., 2021).

Мета досліджень полягає в обґрунтуванні методів підвищення технічної готовності парку гідросистем зернозбиральних комбайнів технологічного комплексу та оптимізації його використання з урахуванням технічного стану та сезонного навантаження.

Результати досліджень. При експлуатації зернозбиральних комбайнів найбільший інтерес становлять показники безвідмовності та комплексні показники надійності їх гідросистем. Існуючі методики визначення потреби господарства в зернозбиральній техніці не враховують диференціацію машин з технічного стану і є лише визначення усередненої кількісної потреби у техніці до виконання запланованих робіт. Розподіл машин по ресурсним групам дозволить планувати використання

комбайнів з різною інтенсивністю навантаження технологічних систем та трансмісії комбайна та знижувати їх сезонне напрацювання у міру збільшення потоку відмов та витрат на технічний контроль і ремонт.

Особливість експлуатації зернозбиральних комбайнів полягає в тому, що вони використовуються для обмеженої кількості сільськогосподарських операцій протягом обмеженого агротехнічного терміну. Відповідно, втрати внаслідок відмов під час збирального періоду включають не тільки витрати на ремонт гідросистем комбайнів, а й втрати врожаю через порушення агротехнічних термінів внаслідок простою. З урахуванням цього для підвищення часу безвідмовної роботи гідросистем комбайнів при підготовці до сезону необхідно включати не тільки планові операції технічного контролю та ремонту, а й дефектування та заміну складальних одиниць та агрегатів, які не виробили свій ресурс, але можуть вийти з ладу протягом планованого сезонного напрацювання. Вартість усунення наслідків відмов гідросистем, проведення технічного контролю і ремонту схематично представлено на рисунку 1: T_1, T_2, \dots, T_5 – напрацювання і $T_{1\text{опт}}, T_{2\text{опт}}, \dots, T_{5\text{опт}}$ – оптимальне напрацювання у ресурсних групах 1, 2...5 з коефіцієнтом оперативної готовності, близьким до одиниці; $C_{i+1} - C_i$ – вартість усунення наслідків відмов гідросистем комбайнів; $C'_i - C_{i-1}$ – вартість ремонтних дій планово-попереджувальної системи та технічного обслуговування гідросистем комбайнів.

На підставі аналізу зміни вартості підтримки гідросистем комбайна у працездатному стані, можна виділити межі ресурсних груп, основними критеріями яких будуть досягнуті показники надійності при наявному напрацюванні гідросистем, обсяг ремонтних впливів планово-попереджувальної системи обслуговування, прогнозоване сезонне напрацювання, а також вартість усунення наслідків відмов гідросистем комбайна. Також важливим фактором при розрахунку складу парку зернозбиральних комбайнів та плануванні його сезонного

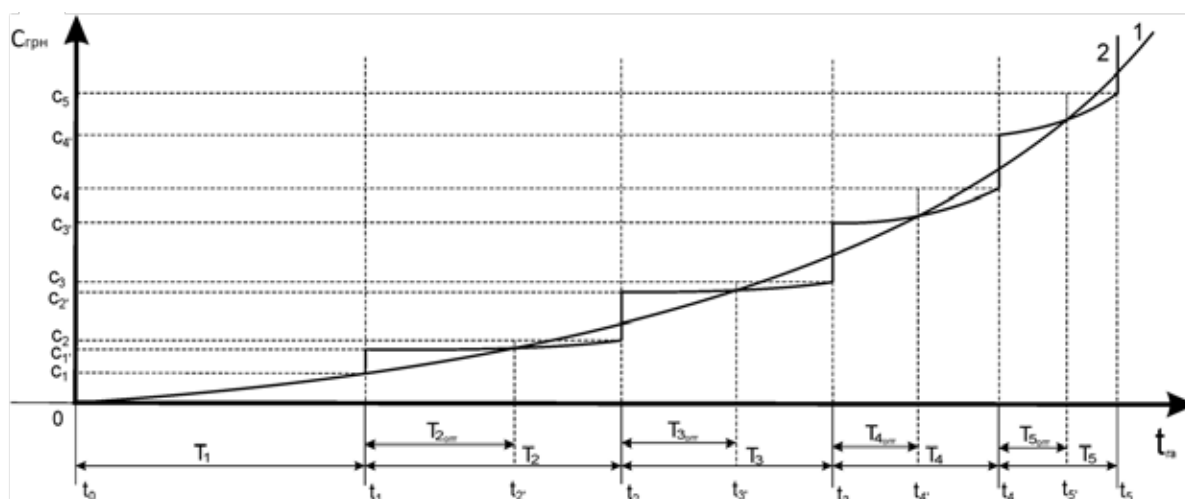


Рис. 1. Залежність зростання експлуатаційних витрат при усуненні наслідків відмов гідросистем комбайнів у міру їх виникнення (1) та за системи технічного контролю і ремонту (2) та визначення меж ресурсних груп залежно від напрацювання

навантаження буде ринкова вартість комбайнів для кожної із ресурсних груп, зниження якої також відбувається нелінійно.

Оптимізація напрацювання гідросистем комбайна полягає у визначенні меж ресурсних груп, зниженні напрацювання за межами зниження коефіцієнта оперативної готовності, що призводить до простою комбайнів та втрат у результаті порушення агротехнічних термінів. Так як сезонна експлуатація зернозбиральних комбайнів складається з декількох етапів збирання різних культур або їх сортів, що мають різні терміни дозрівання, математично дана модель виражається:

$$C = \sum C_i \rightarrow \max \quad (1)$$

де C і C_i – прибуток, одержуваний підприємством за сезон та на i -му етапі збирання.

Прибуток, одержуваний кожному з етапів, має такий вираз:

$$C_i = C_{\text{дох}_i} - (C_{\text{роб}_i} + C_{\text{зч}_i} + C_{\text{ф}_i}) \rightarrow \max \quad (2)$$

де $C_{\text{дох}_i}$, $C_{\text{роб}_i}$, $C_{\text{зч}_i}$ і $C_{\text{ф}_i}$ – дохід, який отримується від виконання робіт, вартість витрат на усунення наслідків відмови, витрати на запасні частини та вартісні втрати врожаю від порушення агротехнічних термінів, грн.

Кількість комбайнів, необхідних на етапі f , розраховується за формулою з урахуванням встановленого коефіцієнта готовності для кожної з ресурсних груп за формулою:

$$n_f = \sum_{i=1}^n \frac{S_f}{W_f \times K_{\text{зм}} \times T_{\text{зм}} \times n_{\text{днф}} \times K_f} \quad (3)$$

де S_f – площа, що забирається на одному етапі, га; W_f – продуктивність, при збиранні цієї культури, га/год; $K_{\text{зм}}$ – коефіцієнт змінності; $T_{\text{зм}}$ – тривалість зміни, годин; $n_{\text{днф}}$ – оптимальні агротехнічні терміни збирання цієї культури.

Коефіцієнт забезпеченості $K_{\text{зб}}$ сільськогосподарських підприємств зернозбиральними комбайнами є відношення необхідної кількості техніки (в еталонних або фізичних одиницях) до наявної кількості (в еталонних або фізичних одиницях):

$$K_{\text{зб}} = \frac{n_{\text{т}}}{n_{\text{н}}} \quad (4)$$

де $n_{\text{т}}$, $n_{\text{н}}$ – необхідна кількість техніки і кількість техніки, що є в наявності, шт.

Залежно від коефіцієнта забезпеченості підприємство може мати оптимальний $K_{\text{зб}} = 1$, надлишковий $K_{\text{зб}} > 1$ або недостатній $K_{\text{зб}} < 1$ склад парку зернозбиральних комбайнів. Значення даного коефіцієнта є основою вибору методу оптимізації сезонного навантаження для ресурсної групи комбайнів. Для розподілу оптимального складу парку в межах власного господарства, коли основною метою є дотримання агротехнічних термінів на всіх збиральних площах, застосовується лінійне програмування. Оптимізація проводиться з найменшими вар-

тісними показниками, розподіл навантаження враховує величину збиральних площ, їх віддаленість та коефіцієнт готовності машин у ресурсних груп.

У разі перевищення коефіцієнта забезпеченості існує можливість вибору – оптимізація розподілу навантаження здійснюється за допомогою лінійного програмування, але створюється можливість значного недовикористання ресурсу, або склад парку оптимізується і з нього виділяється ненавантажений резерв, розподіл напрацювання якого відбувається за допомогою методу динамічного програмування.

Метод динамічного програмування застосовується у тому разі, коли коефіцієнт забезпеченості недостатній. При розрахунку оптимального розподілу формулу визначення ваги грані включається оцінка можливих втрат від порушення агротехнічних термінів.

У загальному вигляді алгоритм вибору математичної моделі оптимізації парку зернозбиральних комбайнів та розподілу сезонного навантаження подано на рисунку 2.

Якщо кількість зернозбиральних комбайнів з урахуванням їхнього марочного складу та технічного стану відповідає потребі підприємства, то для вирішення задачі розподілу навантаження з найменшими вартісними показниками використовують симплекс-метод для лінійних функцій із системою обмежень (5). Для завдання із правильним балансом $\sum a_i = \sum b_j$ математична постановка завдання полягає у визначенні мінімального значення функції витрат на доставку комбайна до збиральних площ:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F_{ij} \rightarrow \min \quad (5)$$

при обмеженнях: $\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j$; $\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i$; $x_{ij} \geq 0$,
($i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$)

де a_i ($i = 1, 2, \dots, m$) – прогнозоване напрацювання одного комбайна, що знаходиться на i -у пункті відправлення; b_j ($j = 1, 2, \dots, n$) – збиральна площа на j -му пункті призначення; c_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$) – вартість доставки комбайна i -го пункту відправлення до j -ого пункту призначення; x_{ij} – кількість комбайнів, що перевозяться з i -го пункту відправлення в j -й пункт призначення.

Якщо коефіцієнт забезпеченості більше одиниці (див. рис. 2), то зі складу парку можна виділити ненавантажений резерв і використовувати його поза господарства. При використанні ненавантаженого резерву оптимізація всього парку поводитьсь за допомогою математичної моделі лінійного програмування.

Для оптимізації напрацювання ненавантаженого резерву, що виділяється, а також у разі, коли ресурс комбайна недостатній для виконання робіт на всіх етапах, необхідно визначити, на яких полях робота буде найбільш вигідна. Це можна визначити шляхом застосування методу динамічного програмування, в основі якого лежить принцип оптимальності Беллмана.

Так як поля мають різні розміри і різну віддаленість, то вага ребра при побудові прямої рекурентної прогонки

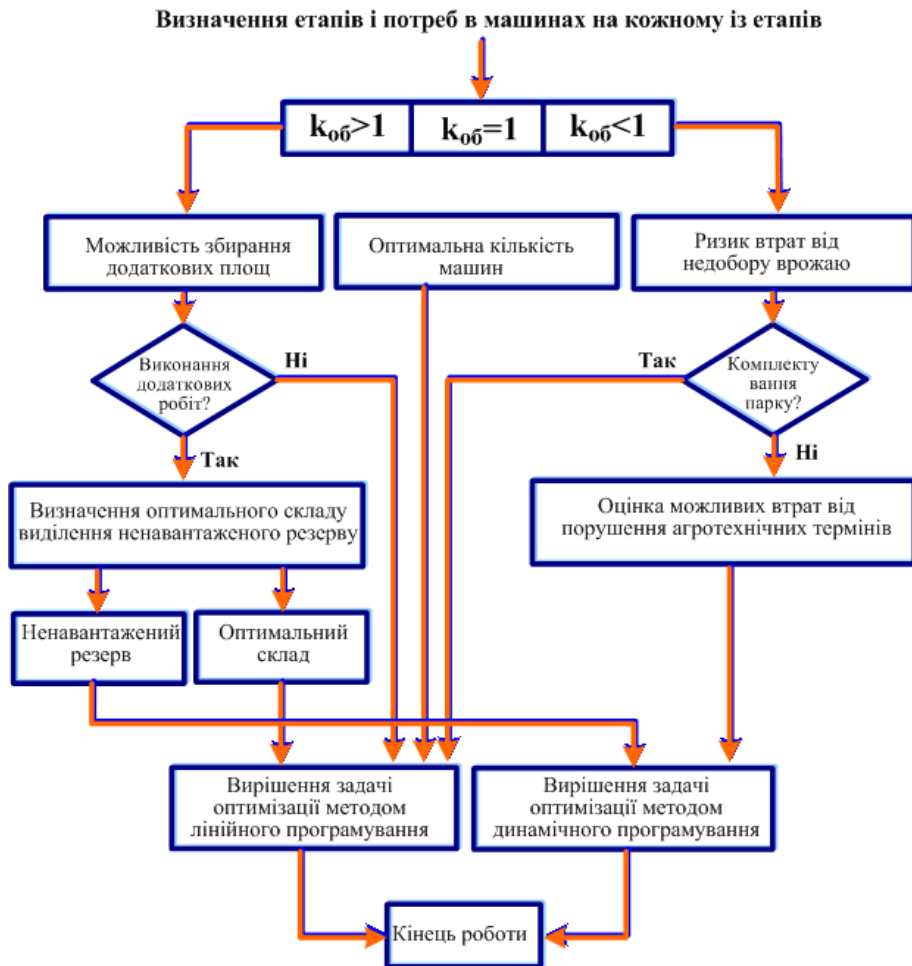


Рис. 2. Алгоритм оптимізації сезонного навантаження парку зернозбиральних комбайнів

визначається доходом, який отримує господарство від виконання даним комбайном певної роботи та витратами на транспортування комбайна до місця роботи, а також вартісними втратами від простою під час усунення наслідків можливих відмов та порушенням агротехнічних термінів внаслідок цього.

Рекурентні обчислення динамічного програмування можна виразити математично в такий спосіб. Найменший дохід $f_i(x_i)$, що отримується при збиранні врожаю до вершини (x_i) на етапі i :

$$f_i(x_i) = \max \{d(x_{i-1}, x_i) + f_{i-1}(x_{i-1})\}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

де (x_{i-1}, x_i) – всі доступні маршрути.

$$d(x_{i-1}, x_i) = C_{S_{ij}} - C_{I_{(x_{i-1}, x_i)}} \quad (7)$$

де $C_{S_{ij}}$ – дохід від прибирання площі S_{ij} на етапі j поля.

При цьому на оптимізацію цього виразу накладається обмеження $S_{ij} \leq S_{\max}$ так як максимальна площа, що забирається комбайном протягом одного етапу дорівнює $S_{\max_i} = W_r \times K_r \times T \times K_{\text{зм}} \times D_{\text{опт}}$, то $S_{i+1, j} = S_{\max} - S_{ij}$. При цьому S_{\max_i} виходячи з умови завдання задається у вигляді максимального прогнозованого напрацювання для даної ресурсної групи. $C_{I_{(x_{i-1}, x_i)}}$ вартість транспор-

тування одного комбайна від вузла x_{i-1} до вузла x_i , переважно залежить від віддаленості філій на $i-1$ і i етапах.

Враховуючи вартість комбайнів у ресурсних груп $(C_{A_i} = C_{P_{A_i}} + C_{CP_{A_i}})$ та вартість технічного обслуговування та ремонту в період їх експлуатації, визначимо оптимальний ефект від використання комбайна цієї ресурсної групи для збирання представлених полів:

$$C_{\text{еф.}} = f_i(x_i) - (C_{A_i} + C_{\text{ТОіP}_{A_i}} + C_{\text{експл}}) \quad (8)$$

де – вартість комбайна на початку експлуатації в ресурсних групах A_i ; $C_{P_{A_i}}$ – ринкова вартість комбайна в ресурсних групах A_i ; $C_{CP_{A_i}}$ – вартість ремонту при підготовці до сезону в ресурсних групах A_i ; $C_{\text{ТОіP}_{A_i}}$ – вартість технічного обслуговування та середні витрати на усунення наслідків відмов у період збирання в ресурсних групах A_i ; $C_{\text{експл}}$ – питомі витрати на експлуатацію комбайна при збиранні цієї культури.

Графічне представлення алгоритму розподілу сезонного навантаження із застосуванням засобів динамічного програмування представлено рисунку 3.

Програма роботи передбачає збирання та обробку інформації про напрацювання комбайнів, зміну показників надійності протягом експлуатації, проведення техніч-

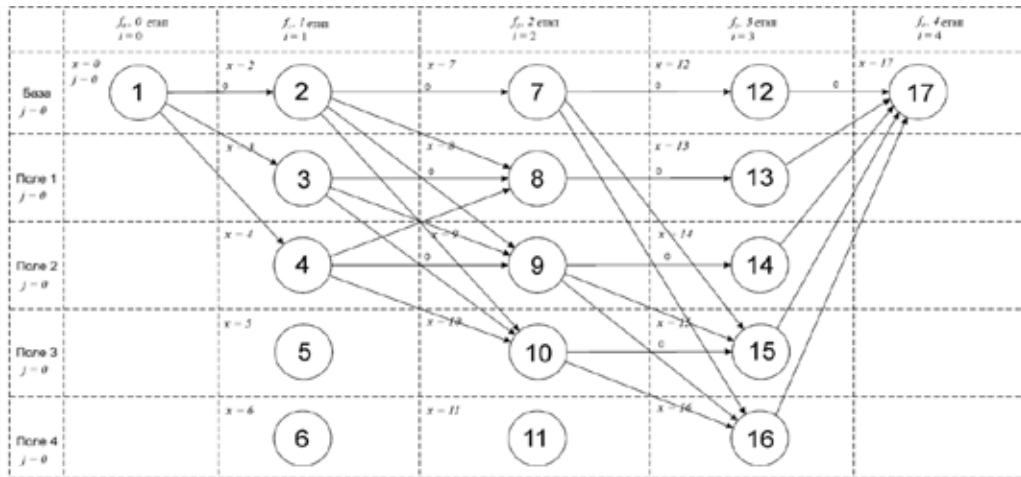


Рис. 3. Приклад побудови прямої рекурентної прогонки динамічного програмування

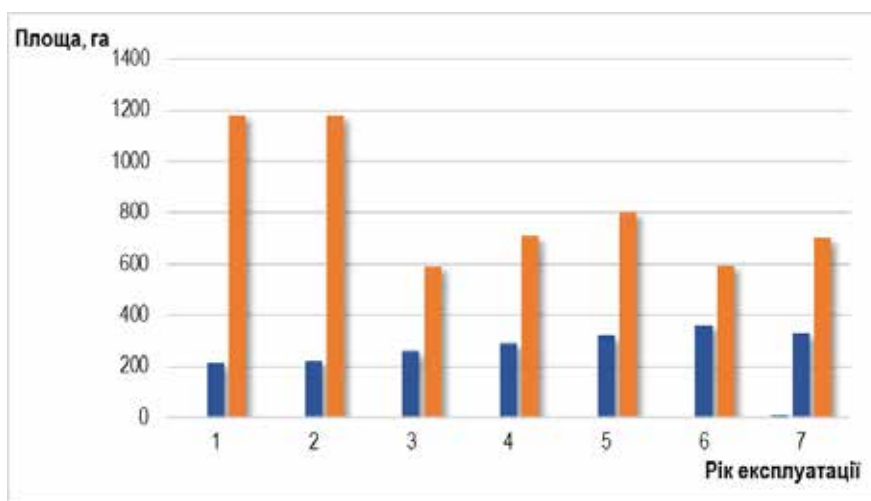


Рис. 4. Порівняння середнього навантаження на один комбайн по країні та напрацювання по обстежуваному парку комбайнів

ного обслуговування та ремонтів при підготовці техніки до сезону.

Експлуатаційні випробування проводилися відповідно за планом NMT, згідно з яким під наглядом знаходилося $N=39$ комбайнів, об'єкти, що відмовилися, піддавалися відновленню, і спостереження за ними тривали до виконання заданого обсягу робіт – сезонного напрацювання T у конкретному господарстві. Під нагляд брали комбайни однієї марки, які виконували роботи в одному господарстві в одній кліматичній зоні.

На підставі отриманих статистичних даних про збільшення трудомісткості та вартості усунення наслідків відмов та операцій ТОР було визначено межі міжремонтного напрацювання та виділено межі ресурсних груп. У межах ресурсних груп визначали показники надійності – середнє напрацювання на відмову, середній час відновлення, ймовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності за загальним часом, коефіцієнт готовності за оперативним часом та коефіцієнт оперативної готовності. Трудомісткість усунення наслідків відмов, заміну запасних частин та проведення операцій технічного

обслуговування розраховувалося відповідно до «Вказівок щодо нормування робочого часу та кодів помилок комбайнів New Holland серії CL/CS/CXS». Ризик втрат від недобору врожаю оцінювали відповідно до методичних вказівок щодо визначення втрат від простоїв машин з технічних причин.

Для оцінки ефективності застосування математичних моделей оптимізації пропонується використовувати коефіцієнт ефективної роботи (K_{EP}) як відношення річного напрацювання технологічних робочих органів комбайна у годинах до річного напрацювання гідросистеми:

$$K_{EP} = \frac{MG_{TPO}}{MG_{Дв}} \quad (9)$$

де K_{EP} – коефіцієнт ефективної роботи; MG_{TPO} – напрацювання технологічних робочих органів у мотогодинах; $MG_{Дв}$ – напрацювання гідросистеми в мотогодин.

Для вибору об'єкта дослідження було проведено аналіз марочного парку зернозбиральних комбайнів Вінницької області. Комбайн NH CX-840 є одним з най-

поширеніших марок зернозбиральних комбайнів. Більшість комбайнів NH SX-840 експлуатуються в основному в агрофірмі, що призводить до сезонного напрацювання, що набагато перевищує середнє по країні за умови досить високого рівня технічного сервісу.

Експлуатаційні дослідження проводилися в умовах експлуатації зернозбиральних комбайнів. Збирання зернових проводилося у 8 філіях господарств розмірами 702...892 га та віддаленістю 5...95 км. Розподіл культур, що убираються, по частках становив: озима пшениця – 72%, ячмінь – 22%, зерносуміш – 0,5%, овес – 1%, тритикале – 4%, ріпак – 0,5%.

Аналіз напрацювання комбайнів на початок впровадження результатів дослідження представлений на рисунку 5. З малюнка видно що, незважаючи на одночасне введення в експлуатацію та роботу в ідентичних умовах в одному підприємстві, різниця у напрацюванні гідросистем відрізняється в 1,82 рази, а технологічних робочих органів – 2,36 рази.

З рисунків 6 і 7 видно, що різниця у напрацюванні технологічних робочих органів і гідросистем становить від 752 до 1166 мотогодин, а коефіцієнт ефективної роботи варіюється від 0,56 до 0,73. Перші два роки є типовими для рядової експлуатації в умовах Вінницької області. Велика різниця у напрацюванні гідросистем і технологічних робочих органів в цей період пояснюються виконанням робіт у центральних областях України, куди

машини прямували своїм ходом. Менша напрацювання у рік пояснюється лише тим, що з купівлі техніка було поставлено заводом-виробником немає до місця постійного базування, а до місця виконання додаткових робіт.

В результаті підконтрольної експлуатації було зібрано фактичний матеріал, що характеризує динаміку зміни трудомісткості усунення наслідків відмов, технічного контролю і ремонту та вартості запасних частин і збільшення вартості підтримки зернозбирального комбайна у справному стані.

Отримані відомості було узагальнено у підсумковому графіку збільшення вартості підтримки комбайнів у справному стані.

На основі аналізу даних, наведених на рисунку 8, після першого етапу досліджень було встановлено параметри ресурсних груп, що наводяться у таблиці 1, а саме прогнозоване сезонне напрацювання, коефіцієнт готовності за оперативним часом, коефіцієнт готовності за основним часом, вартості підготовки до сезону та усунення наслідків відмов.

Обговорення. На етапі застосування оптимізація експлуатації проводилася відповідно до розробленого алгоритму (Rogovskii, 2019). Додаткові роботи не виконувались, заплановане напрацювання не перевищувало прогнозованого (Rogovskii et al., 2021). Оптимізація проводилася на етапі збирання ярих культур за допомогою динамічного програмування (Achkoski et al., 2017).



Рис. 5. Напрацювання гідросистем та технологічних робочих органів з обстежуваних одиниць зернозбиральних комбайнів

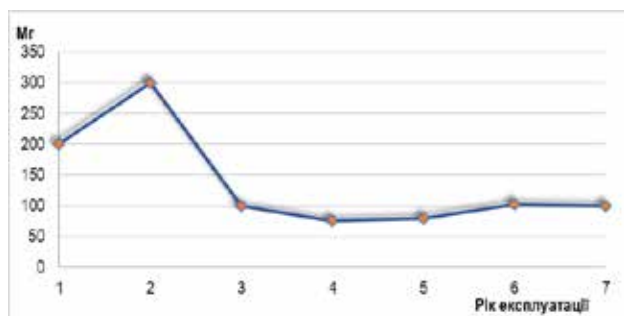


Рис. 6. Різниця у напрацюванні гідросистем та жнивarki за роками дослідження

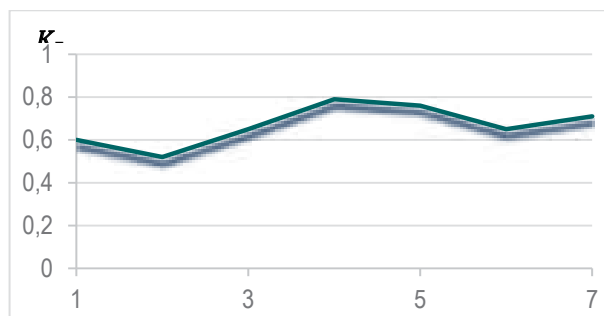


Рис. 7. Коефіцієнт ефективної роботи з років дослідження

Параметри ресурсних груп

Ресурсна група	1	2	3	4	5
Прогнозоване сезонне напрацювання, га	2500	1200	800	600	500
Коефіцієнт готовності за оперативним часом	0,99	0,97	0,95	0,95	0,93
Коефіцієнт готовності за основним часом	0,99	0,98	0,92	0,88	0,83
Ринкова вартість, % від початкової вартості	100	78,26	70,65	54,13	43,48
Вартість підготовки до сезону, у % від початкової вартості (наростаючим підсумком)	0	2,25	6,29	8,47	11,06
Вартість усунення наслідків відмов, % від початкової вартості (наростаючим результатом)	4,76	7,92	8,74	10,39	11,55

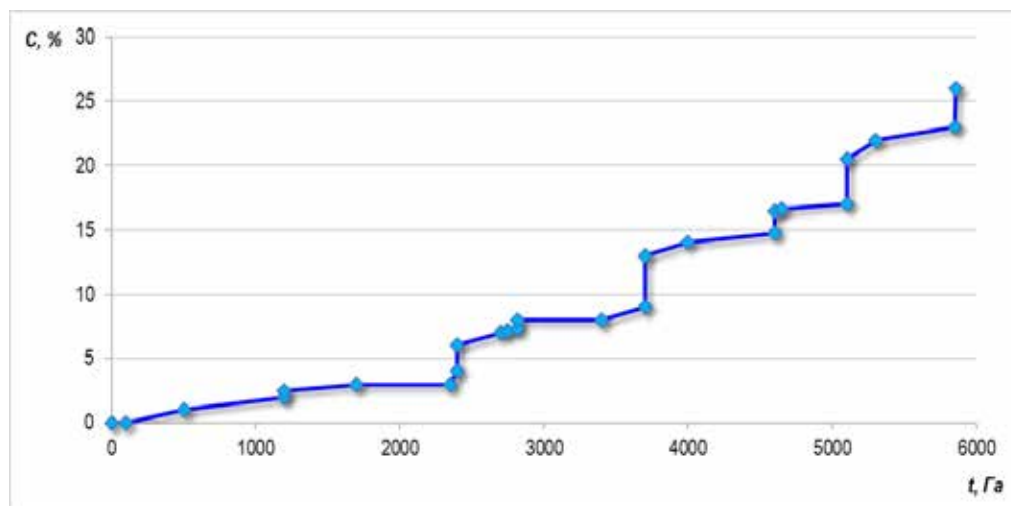


Рис. 8. Підсумковий графік збільшення вартості підтримки комбайнів у справному стані у відсотках від початкової вартості комбайна залежно від напрацювання у зібраних обсягах за період спостереження

На підставі статистичних даних про зміну вартості зернозбирального комбайна марки New Holland CX-840 та збільшення вартості підтримки його у працездатному стані було проведено оцінку максимально доцільного напрацювання (Zubko et al., 2022). У контрольній групі витрата палива на прибирання одного гектара становила 13,15 літра при коефіцієнті ефективної роботи 0,75, а експериментальній групі – 12,95 літра при коефіцієнті ефективної роботи 0,81.

Висновки. Аналіз показників надійності технологічного комплексу зернозбиральних комбайнів виявив, що із зміною технічного стану та збереженням виробничих умов відбувається зростання кількості відмов, вартість усунення наслідків відмов збільшується в середньому на 1,5-2% від первісної вартості комбайна на рік. Встановлено, що при збереженні виробничих умов та сумарному напрацюванні 350 га відбувається різке зниження коефіцієнта готовності за основним часом з 0,98 до 0,92, подальше зниження становить 4...5% на рік. На підставі аналізу 7 років експлуатації розроблено методику розподілу зернозбиральних комбайнів

на 5 ресурсних груп щодо відносної зміни мінімуму експлуатаційних витрат на передсезонну підготовку. Планово-попереджувальне обслуговування для виділених груп зернозбиральних комбайнів та оптимальне розподілення сезонного навантаження з урахуванням коефіцієнта ефективної роботи дозволяє підтримувати коефіцієнт готовності рівним 0,98 протягом усього терміну експлуатації. Оптимізація розподілу сезонного навантаження технологічного комплексу зернозбиральних комбайнів для коефіцієнта забезпеченості технікою ≥ 1 дозволяє знизити експлуатаційні витрати за рахунок скорочення плечей переїздів, при коефіцієнті забезпеченості технікою > 1 дає можливість виділити ненавантажений резерв техніки та збільшити його навантаження за критерієм максимуму доходу від виконання робіт мінімізувати біологічні втрати культури, що забирається, при коефіцієнті забезпеченості < 1 . Перевірка імітаційної моделі роботи технологічного комплексу зернозбиральних комбайнів, спрямована на зниження експлуатаційних витрат, показала можливість сходження результатів у 4,3%.

Бібліографічні посилання:

- Achkoski, J., Koceski, S., Bogatinov, D., Temelkovski, B., Stevanovski, G. & Kocev I. (2017). Remote triage support algorithm based on fuzzy logic. Journal of the Royal Army Medical Corps, 163(3): 164–170. <https://doi.org/10.1136/jramc-2015-000616>.
- Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation. European Journal of Operational Research, 253(1): 1–13.

3. Caffaro, F., Cremasco, M., Roccato, M. & Cavallo E. (2020). Drivers of farmers' intention to adopt technological innovations in Italy: The role of information sources, perceived usefulness, and perceived ease of use. *Journal of Rural Studies*, 76: 264–271.
4. Gurcanli, E., Bilir, S., & Sevim, M. (2015). Activity based risk assessment and safety cost estimation for residential building construction projects. *Safety Science*, 80: 1–12.
5. Gyansah, L. & Ansah, A. (2020). Fatigue crack initiation analysis in 1060 steel. *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*, 4(2): 319–325.
6. Hrynkiv, A., Rogovskii, I., Aulin, V., Lysenko, S., Titova, L., Zagurskiy, O. & Kolosok, I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(105): 19–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206073>.
7. Huang, N. (2015). On Holo-Hilbert spectral analysis: a full informational spectral representation for nonlinear and non-stationary data. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physica*, 6: 13–26. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0206>.
8. Kavka, M., Mimra, M. & Kumhála, F. (2016). Sensitivity analysis of key operating parameters of combine harvesters. *Research in Agricultural Engineering*, 62(3): 113–121.
9. Kuzmich, I. M., Rogovskii, I. L., Titova, L. L., & Nadtochiy, O. V. (2021). Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 677: 052002. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002>.
10. Kypris, O., Nlebedim, I., & Jiles, D. (2016). Measuring stress variation with depth using Barkhausen signal. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials – Science Direct*, 407: 377–395.
11. Li, K., Qi, X., Wei, B., Huang, H., Wang, J. & Zhang, J. (2017). Prediction of transformer top oil temperature based on kernel extreme learning machine error prediction and correction. *High Voltage Engineering*, 43(12): 4045–4053. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20171127032>.
12. Matindi, R., Masoud, M., Hobson, P., Kent, G. & Liu, S. (2018). Harvesting and transport operations to optimise biomass supply chain and industrial biorefinery processes. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(3): 265–288.
13. Miu, V. (2016). Combine harvesters: theory, modeling and design. *CRC*, 6: 208–242.
14. Mozharivskiy, D. M., Titova, L. L., Nadtochiy, O. V. & Dasic, P. (2022). Aspects of expert system of engineering management of technical condition of grain harvesters. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, 13(1): 60–66. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2022.01.060>.
15. Najafi, P., Asoodar, M., Marzban, A., & Hormozi, M. (2015). Reliability analysis of agricultural machinery: a case study of sugarcane chopper harvester. *AgricEngInt: CIGR Journal*, March 17(1): 158–165.
16. Nazarenko, I., Dedov, O., Bernyk, I., Rogovskii, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A. & Titova, L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7–108): 71–79. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>.
17. Nazarenko, I., Mishchuk, Y., Mishchuk, D., Ruchynskiy, M., Rogovskii, I., Mikhailova, L., Titova, L., Berezovyi, M. & Shatrov, R. (2021). Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7(112)): 41–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
18. Nykyforchyn, H., Lunarska, E., & Tsyrlunyk, O. (2019). Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline. *Engineering Failure Analysis*, 17: 624–632.
19. Pöhlitz, J., Rücknagel, J., Koblenza, B., Schlüter, S., Vogelb, Hans-Jörg & Olaf, C. (2018). Computed tomography and soil physical measurements of compaction behaviour under strip tillage, mulch tillage and no tillage. *Soil and Tillage Research*, 175: 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.007>.
20. Rejovitzky, E. & Altus, E. (2013). On single damage variable models for fatigue. *International Journal of Damage Mechanics*, 22(2): 268–284.
21. Rogovskii, I., Titova, L., Novitskii, A. & Rebenko, V. (2019). Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for Rural Development*, 18: 291–298. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N451>.
22. Rogovskii, I. L. (2019). Systemic approach to justification of standards of restoration of agricultural machinery. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine, 10(3): 181–187. <https://doi.org/10.31548/machenergy2019.03.181>.
23. Rogovskii, I. L., Titova, L. L., Gumenyuk, Yu. O. & Nadtochiy, O. V. (2021). Technological effectiveness of formation of planting furrow by working body of passive type of orchard planting machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 839: 052055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052055>.
24. Romaniuk, W., Polishchuk, V., Marczuk, A., Titova, L., Rogovskii, I. & Borek, K. (2018). Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. *Agricultural Engineering*, 22(1): 105–125. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0010>.
25. Tyutrin, S. (2019). Improving reliability of parts of mounted mower according to monitoring results by fatigue gauges from tin foil. *Engineering for Rural Development*, 18: 22–27.
26. Voinalovych, O., Hnatiuk, O., Rogovskii, I., & Pokutnii, O. (2019). Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. *Engineering for rural development*, 18: 563–569.

27. Xu, L., Wei, C., Liang, Z., Chai, X. & Li, Y. (2019). Development of rapeseed cleaning loss monitoring system and experiments in a combine harvester. *Biosystems Engineering*, 178: 118–130.

28. Yezekyan, T., Marinello, F., Armentano, G., Trestini, S. & Sartori, L. (2020). Modelling of harvesting machines' technical parameters and prices. *Agriculture*, 10(6): 194–204.

29. Zubko, V., Sirenko, V., Kuzina, T., Koszel, M., & Shchur, T. (2022). Modelling wheat grain flow during sowing based on the model of grain with shifted center of gravity. *Agricultural Engineering* this link is disabled, 26(1): 25–37. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2022-0003>.

Zadorozhniuk D. V., Postgraduate student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Algorithmics of seasonal failure of hydrosystems of grain harvesting combines

The article formulates methodical optimization approaches to increase the operational readiness of the park and increase seasonal production due to the optimal distribution of work between groups of grain harvesters.

The authors developed a method of optimizing the seasonal load of resource groups of grain harvesters of the technological complex, taking into account their technical condition and operating conditions. At the same time, the process of machine use of a combine harvester is considered as a feature of the operation of combine harvesters, as such that they are used for a limited number of agricultural operations during a limited agrotechnical term. Based on the analysis of changes in the cost of maintaining the hydraulic systems of the harvester in working condition, the author identified the limits of resource groups, the main criteria of which were the achieved reliability indicators with the available working time of the hydraulic systems, the amount of repair effects of the scheduled and warning maintenance system, the projected seasonal working time, and the cost elimination of the consequences of hydraulic system failures of the harvester. Also, an important factor when calculating the composition of the fleet of grain-harvesting combines and planning its seasonal load is the justified market value of combines for each of the resource groups, the decrease of which also occurs non-linearly. Optimizing the performance of hydraulic systems of the harvester consists in determining the limits of resource groups, reducing the performance beyond the reduction of the coefficient of operational readiness, which leads to the downtime of combines and losses as a result of violation of agrotechnical deadlines. Since the seasonal operation of grain harvesters consists of several stages of harvesting different crops or their varieties, which have different ripening periods.

In the article, the dependence of the growth of operating costs in the elimination of the consequences of failures as they occur and in the case of a planned and warning system of technical control and repair and the determination of the limits of resource groups depending on the performance is obtained. The algorithm for optimizing the seasonal load of the fleet of grain harvesters is substantiated. The results of a comparison of the average load per combine harvester across the country and the performance of the inspected fleet of grain harvesters are presented.

The obtained results, as a perspective for further research, can be used by agricultural farms when equipping the harvester fleet with both domestic and imported models of grain harvesters.

Key words: algorithm, grain harvester, reliability, crop loss, criterion.