

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка

Шевченко Сергій Анатолійович

УДК 631.3:621.8.004.58

**КОНЦЕПЦІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В РОСЛИННИЦТВІ
ТЕХНІЧНИМ ОБСЛУГОВУВАННЯМ ЗА СТАНОМ**

05.05.11 – машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Войтов Віктор Анатолійович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка,
завідувач кафедри транспортних технологій і логістики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кюрчев Володимир Миколайович,
Таврійський державний агротехнологічний університет,
ректор;

доктор технічних наук, професор
Войтюк Валерій Дмитрович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України,
завідувач кафедри технічного сервісу та інженерного
менеджменту імені М. П. Момотенка;

доктор технічних наук, професор
Аулін Віктор Васильович,
Центральноукраїнський національний технічний
університет,
професор кафедри експлуатації та ремонту машин.

Захист відбудеться «06» червня 2019 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських (Артема), 44.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських (Артема), 44.

Автореферат розісланий « _____ » _____ 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Є. І. Калінін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У сучасних умовах вимоги до технічної експлуатації машин для рослинництва зростають внаслідок дії ряду факторів: зменшення машино-тракторного парку господарств; підвищення продуктивності, надійності, вартості машин і термінів їх експлуатації; посилення конкуренції в зв'язку з глобалізацією аграрного ринку; вплив змін клімату та зменшення вологості ґрунтів на агростроки механізованих робіт. Отже, у рослинництві все актуальнішою стає проблема підвищення ефективності машиновикористання, яке в значній мірі впливає на результати виробничої діяльності та конкурентоспроможність господарств.

Перспективи підвищення ефективності машиновикористання полягають у технічному обслуговуванні машин за станом, однак його застосування в рослинництві стримується через недосконалість теоретичного обґрунтування. Насамперед це стосується обґрунтування показників ефективності машин для рослинництва (з обов'язковим урахуванням зменшення врожайності внаслідок відмов), визначення впливу обслуговування за станом агрегатів машин на зазначені показники, розробки методів оптимізації параметрів обслуговування агрегатів машин за станом (враховуючи наявність тривалого інкубаційного етапу розвитку дефекту), удосконалення діагностичних ознак стану трибосистем, що й обумовлює актуальність дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до Закону України «Про стимулювання розвитку вітчизняного машинобудування для агропромислового комплексу» №5478-VI (5478-17) від 06.11.2012 р., Постанови Кабінету Міністрів України №942 від 07.09.2011 р. «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямків наукових досліджень і науково-технічних розробок до 2015 року», Державної цільової програми «Розвиток українського села до 2015 р.», науково-дослідної теми «Науково-технологічні основи функціонування і підвищення ефективності використання сільськогосподарської техніки шляхом діагностування» (ДР № 0110U001533), де автор є керівником, і науково-дослідної теми «Дослідження, наукове обґрунтування і впровадження конкурентоспроможних, ресурсозберігаючих технологій, способів реновації, нових матеріалів і технічних засобів для інноваційного розвитку» (ДР 0109U000362), де автор є виконавцем.

Мета дослідження: підвищення ефективності використання машин для рослинництва шляхом оптимізації їх технічного обслуговування за станом.

Завдання дослідження:

- проаналізувати сучасний стан досліджень з підвищення ефективності використання машин для рослинництва;
- обґрунтувати методологію дослідження з підвищення ефективності використання машин для рослинництва шляхом оптимізації технічного обслуговування за станом;
- дослідити застосування коефіцієнта готовності як показника ефективності використання машин для рослинництва та обґрунтувати методики його визначення та прогнозування;

– дослідити вплив стаціонарного і нестаціонарного потоків відмов машин на коефіцієнт реалізації біопотенціалу (КРБП) рослин і ефективність використання машин;

– дослідити вплив обслуговування машин за станом перед технологічною операцією на КРБП рослин і ефективність машиновикористання;

– дослідити залежності показників ефективності машиновикористання від параметрів обслуговування агрегатів машин для рослинництва за станом та обґрунтувати методику їх оптимізації;

– провести експериментальні дослідження акустико-емісійних сигналів зразків машин для рослинництва та обґрунтувати ознаки дефектів трибосистем ковзання і кочення, які є інваріантними до масштабування сигналу емісії по амплітуді.

Об'єкт дослідження: технологічний процес рослинництва з урахуванням відмов машин.

Предмет дослідження: концепція підвищення ефективності машиновикористання в рослинництві технічним обслуговуванням за станом.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є системний підхід та імовірнісний аналіз процесів функціонування машин для рослинництва, їх обслуговування за станом, виникнення відмов і відновлення машин. Для цього розробляється система взаємопов'язаних математичних моделей, які відображують суттєві аспекти зазначених процесів на різних рівнях деталізації – рівнях агрегату машини для рослинництва, машини, технологічної операції та технологічного процесу рослинництва.

Теоретичні дослідження, що стосуються визначення та прогнозування коефіцієнта готовності машин для рослинництва, виконано методом математичного моделювання із застосуванням методу ланцюгів Маркова, методів інтерполяції та екстраполяції часових рядів. При дослідженні впливу відмов машин на зменшення КРБП рослин використано теорію ймовірностей. При дослідженнях з оптимізації обслуговування агрегатів машин для рослинництва за станом використано метод дослідження операцій і теорію випадкових процесів. При експериментальних дослідженнях і обґрунтуванні акустико-емісійних діагностичних параметрів трибосистем використано методи планування експерименту та математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в новому вирішенні наукової проблеми підвищення ефективності технологічних процесів рослинництва шляхом оптимізації технічного обслуговування машин для рослинництва за станом на єдиній методологічній основі ймовірнісного аналізу процесів функціонування машин, їх діагностування, запобігання та виникнення відмов і відновлення машин. При цьому

вперше:

– обґрунтовано визначення еквівалентного коефіцієнта готовності машини для рослинництва, яке враховує залежність КРБП рослин від часу та нестаціонарність потоку відмов, що дає змогу характеризувати ефект від обслуговування машини за станом перед технологічною операцією з урахуванням його впливу на середній КРБП рослин;

– встановлено залежність зміни в часі параметра потоку відмов об'єктів після обслуговування за станом в умовах випадкової швидкості збільшення розміру дефекту і невизначеності моменту завершення інкубаційного етапу його розвитку;

– для обслуговування перед технологічною операцією агрегатів машин, які відмовляють внаслідок дефектів із тривалим інкубаційним етапом, встановлено взаємозв'язок оптимального значення порогу превентивної заміни зі швидкістю зменшення КРБП рослин із часом, порогом коригувальної заміни, розподілом швидкості розвитку дефекту, відносними вартостями агрегату та його заміни при коригувальному обслуговуванні та обслуговуванні за станом;

Отримали подальший розвиток:

– залежності для визначення коефіцієнта готовності машин для рослинництва, які враховують їх відновлення в періодичних і випадкових паузах при виконанні технологічних операцій, від показників надійності та ремонтпридатності машин і параметрів пауз;

– залежності для визначення числових характеристик зменшення КРБП рослин внаслідок відмов машини, які враховують числові характеристики тривалості відновлень і параметра потоку відмов;

– акустико-емісійні діагностичні ознаки трибосистем ковзання і кочення, які ґрунтуються на порівнянні емпіричного розподілу сплесків обвідної емісії в часовій області чи їх амплітудного розподілу з теоретичними розподілами сигналів емісії від бездефектних трибосистем, що обумовлює інваріантність результату діагностування до масштабування сигналу емісії по амплітуді.

Удосконалено:

– залежності для визначення та прогнозування миттєвого і середнього значень коефіцієнта готовності машин для рослинництва, які ґрунтуються на визначенні динаміки збільшення накопиченої тривалості відновлень із напрацюванням;

– залежність для визначення показника відповідності системи технічного обслуговування комплексу машин для рослинництва виробничому завданню як імовірності зменшення КРБП рослин внаслідок відмов машин нижче припустимого значення.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі комплексу теоретичних і експериментальних досліджень розроблені способи акустико-емісійного діагностування підшипників кочення, які реалізовано в технологічному процесі та акустико-емісійному тестері для діагностування підшипників кочення машин для рослинництва в процесі експлуатації; методика прогнозування коефіцієнта готовності машин на основі обчислення накопиченої тривалості відновлень, яка дає змогу планувати оновлення машино-тракторного парку з урахуванням очікуваної тривалості виконання технологічних операцій у наступні роки; методика імовірнісного прогнозування зменшення врожайності внаслідок відмов машини при виконанні технологічних операцій; методика визначення коефіцієнта готовності машин, що враховує тривалості елементів виробничого циклу.

Результати досліджень впроваджено в ДП «Дослідне господарство «Кутузівка» Інституту сільського господарства Північного Сходу НААН України», фермерському господарстві «Альфа» та в навчальний процес ХНТУСГ для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати дослідження, що виносяться на захист, отримані автором самостійно та викладені в роботах [1–50]. У наукових роботах, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок полягає в наступному: обґрунтування та розробка вимірювально-реєстраційної підсистеми комплексу для дослідження вібраційних ознак пітінгу [1]; визначення впливу замін елементів за результатами діагностування на продуктивність сільськогосподарських машин [3]; математичне моделювання впливу відмов машин на зменшення врожайності [4]; обґрунтування та розробка вимірювально-реєстраційної підсистеми комплексу для дослідження акустико-емісійних ознак стану трибосистем кочення [9, 48]; обґрунтування визначення показника ефективності використання машин для рослинництва [31]; порівняльний аналіз вібраційних і акустико-емісійних методів діагностування агрегатів машин [46]; обґрунтування структури та розробка мікропроцесорного блоку вимірювального комплексу [49].

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались та отримали позитивні відгуки на Міжнародній науково-технічній конференції (МНТК) «Аграрна інженерія в умовах глобалізації. Проблеми створення машин сільського та лісового комплексів» (2008 р., Київ, НАУ), Міжнародній науково-практичній конференції (МНПК) «Технічний прогрес в АПК» (2008 р., 2010 р.; Харків, ХНТУСГ), МНПК «Проблеми технічного сервісу сільськогосподарської техніки» (2009 р., 2011 р.; Харків, ХНТУСГ), МНПК «Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса» (2009 р., Минск, БГАТУ), МНПК «Проблеми надійності машин і засобів механізації сільськогосподарського виробництва» (2009 р., 2010 р., 2013 р., 2015–2017 рр.; Харків, ХНТУСГ), МНПК «Проблеми сільськогосподарського виробництва на сучасному етапі і шляхи їх вирішення» (2009 р., Белгород, БелГСХА), Міжнародній конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (2009 р., Дніпропетровськ, ДДАУ), Міжнародній науково-методичній конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій АПК» (2010 р., Харків, ХНТУСГ), Всеукраїнській науково-технічній конференції (ВНТК) «Актуальні проблеми конструювання, експлуатації та ремонту обладнання лісового комплексу» (2010 р., 2013 р., 2017 р.; Луцьк, ЛНТУ), Міжнародному науково-практичному форумі «Наукові і практичні аспекти агропромислового виробництва та розвитку сільських регіонів» (2010 р., Львів, ЛНАУ), МНПК «Інноваційні напрямки розвитку технічного сервісу машин» (2012 р., 2013 р., Харків, ХНТУСГ), МНПК «Вібрації в техніці та технологіях» (2012, Полтава, ПНТУ), МНПК «Системотехніка і технології лісового комплексу. Транспортні технології» (2013 р., 2014 р.; Харків, ХНТУСГ), МНПК «Новейшие технологии развития конструкции, производства, эксплуатации, ремонта и экспертизы автомобиля» (2014 р., Харків, ХНАДУ), МНПК «Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу» (2015–2017 р, Харків, ХНТУСГ), МНПК «Новітні технології в автомобілебудівництві та транспорті» (2015–2017 р., Харків, ХНАДУ), МНПК «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (2015 р., Кіровоград, КНТУ), МНТК «Крамаровські читання» (2017 р., Київ, НУБіП), МНПК

«Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (2017 р., Чернігів, ЧНТУ).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 50 наукових працях, у тому числі: 24 статті в спеціалізованих наукових виданнях України; 6 статей у закордонних виданнях; 5 статей в інших виданнях; 12 тез у збірниках доповідей наукових конференцій, отримано 3 патенти.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 446 сторінок, у тому числі 9 додатків на 76 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 298 сторінок, 98 рисунків, 16 таблиць. Список використаних джерел нараховує 322 найменування на 36 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, мету та задачі дослідження, наведено загальну характеристику роботи, надано відомості про особистий внесок автора, апробації, публікації і структуру роботи.

У **першому розділі** «Аналіз стану проблеми підвищення ефективності машиновикористання в рослинництві технічним обслуговуванням за станом», зважаючи на комплексний характер проблеми, проаналізовано наукові дослідження, що стосуються її різноманітних аспектів – обґрунтування показника ефективності використання машин, впливу відмов машин на врожайність рослинних культур, процесів зміни стану трибосистем машин, оптимізації технічного обслуговування машин за станом і діагностування трибосистем машин.

Активний розвиток теорії обслуговування машин за станом та її практичне використання розпочались в 60-х роках минулого сторіччя. Базою для цього стали дослідження надійності машин у роботах Сандлер Дж., Кокс Д. Р., Гнеденка Б. В. Болотіна В. В. і Дружиніна Г. В. та теоретичних основ і практичних методів технічного діагностування в працях Биргера І. А., Пархоменка П. П., Коллакот Р. А. Визначальними для розвитку діагностування та технічного обслуговування за станом мобільних машин стали роботи Говоруценка М. Я., Міхліна В. М., Meng Н. С., Ludema К. С., Аллілуєва В. О. Сучасний стан досліджень і розробок з технічного обслуговування машин для рослинництва за станом та ефективності їх використання в значній мірі визначається роботами Лебедева А. Т., Мигаля В. Д., Ауліна В. В., Войтюка В. Д., Козаченка О. В., Khodabakhshian R., Varadaran J., Shakeri M. і відповідних наукових шкіл.

Хоча коефіцієнт готовності машин широко застосовується в якості комплексного показника надійності машин у промисловості та сільському господарстві, його застосування як показника ефективності використання машин для рослинництва ускладнюється особливостями цієї галузі. Зокрема, зменшення врожайності рослин залежить не лише від тривалості відновлення, а також і від моменту виникнення відмови (частки площі поля, обробленої до настання відмови) [6]. Це не дає змогу використовувати середній коефіцієнт готовності при нестационарному потоці відмов (при технічному обслуговуванні машин за станом перед технологічною операцією рослинництва). Недостатньо дослідженим є вплив на коефіцієнт готовності відновлення машин у планових паузах у добовому робочому циклі (обумовлених агромо-

вами та параметрами машин) і випадкових паузах, обумовлених несприятливими погодними умовами. Що стосується прогнозування коефіцієнта готовності мобільних машин, то не виявлено обґрунтування структури використаних функціональних залежностей. Залишається недослідженим і визначення коефіцієнта готовності технологічного комплексу з різнотипних машин для рослинництва, які відрізняються за продуктивністю і надійністю, а технологічні операції – за впливом часу виконання на врожайність рослинних культур.

Аналіз робіт з технічного обслуговування за станом призвів до висновку, що недослідженою лишається оптимізація обслуговування елементів, які відмовляють внаслідок дефектів із тривалим інкубаційним етапом (наприклад, пітінг), за відсутності даних про тренд діагностичного параметра чи інформації про час виникнення та початковий розмір дефекту.

За результатами порівняння методів діагностування трибосистем машин для рослинництва визначено, що найбільш перспективним є акустико-емісійний метод [32, 46]. Однак актуальним є завдання обґрунтування нових діагностичних ознак стану трибосистем, яким притаманна інваріантність до масштабування сигналу по амплітуді (внаслідок затухання в елементах конструкції чи зміни коефіцієнта перетворення датчика), неінваріантність до зміни порядку слідування відліків сигналу в часі (для виявлення контактування поверхонь на дефектних ділянках), стійкість до імпульсних завад, висока ступінь стискання вимірювальної інформації, невеликий обсяг обчислень [10].

На основі аналізу публікацій сформульовані мета та завдання дослідження.

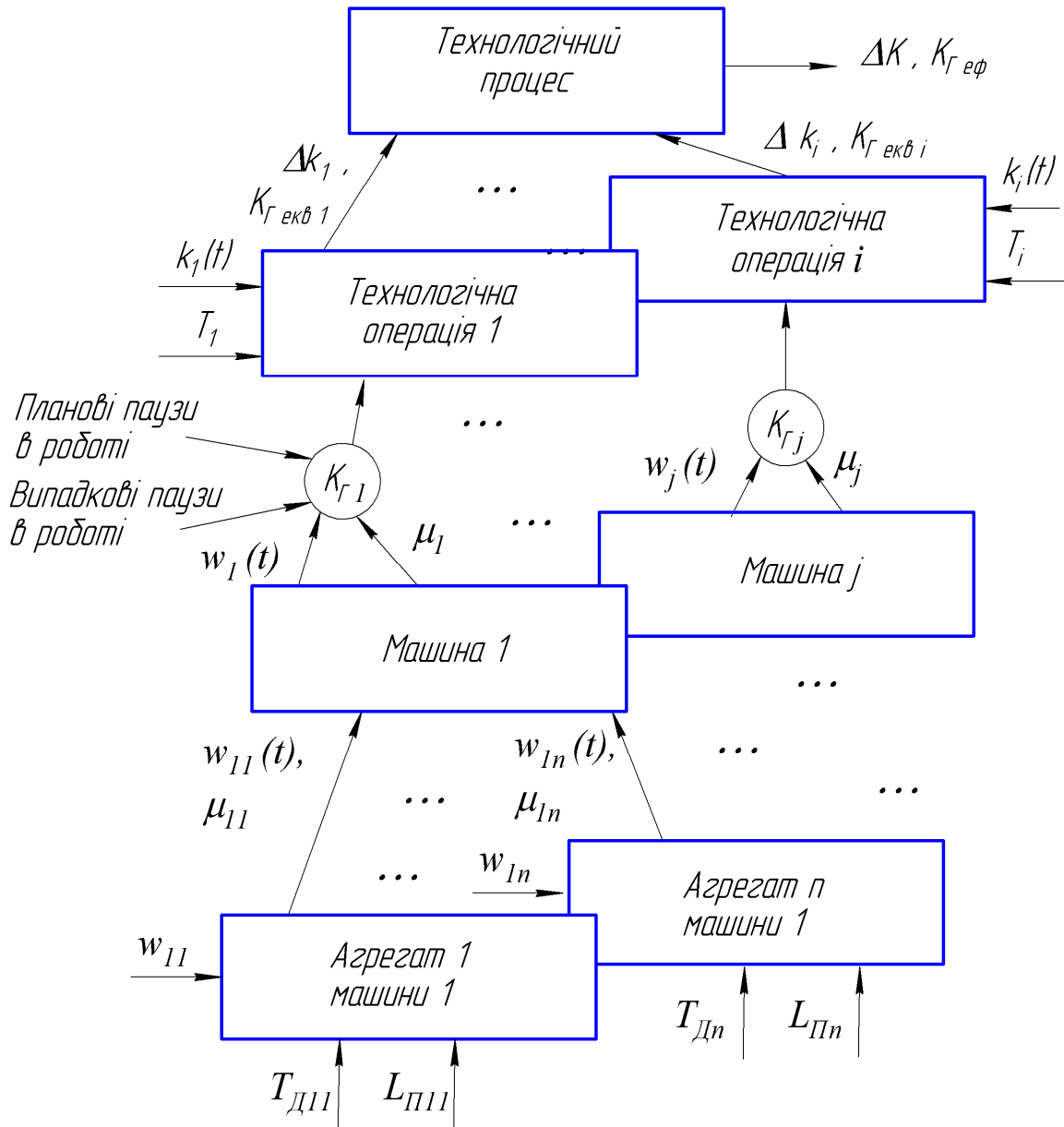
У другому розділі «Методологія досліджень із підвищення ефективності використання машин для рослинництва технічним обслуговуванням за станом» обґрунтовано, що, зважаючи на імовірнісний характер процесів виникнення відмов і відновлень машин, відповідне зменшення врожайності рослин і ефективності використання машин доцільно розглядати як випадкові величини та досліджувати із застосуванням методів теорії надійності машин, теорії ймовірностей і агрокваліметрії, що дасть змогу визначати їх імовірнісні параметри [7. 13].

Аналітичною основою концепції підвищення ефективності використання машин для рослинництва шляхом технічного обслуговування за станом є система взаємопов'язаних математичних моделей, які відображують суттєві аспекти функціонування машин на різних рівнях деталізації – рівнях агрегату машини для рослинництва, машини, технологічної операції та технологічного процесу рослинництва (див. рис. 1). Це дає змогу обґрунтовувати заходи для підвищення ефективності використання машин, досліджуючи процеси їх функціонування та діагностування, запобігання та виникнення відмов і відновлення машин на єдиній методологічній основі ймовірнісного аналізу.

Доведено, що коефіцієнт готовності машин для рослинництва при обслуговуванні за станом (і, отже, нестационарному потоці відмов) доцільно характеризувати його еквівалентним значенням – тобто, значенням коефіцієнта готовності при стаціонарному потоці відмов, яке призводить до такого самого зменшення врожайності, що й при нестационарному потоці [25].

Теоретичними дослідженнями доведено, що готовність технологічного комплексу машин для рослинництва доцільно характеризувати ефективним кое-

фіцієнтом готовності, який визначається через еквівалентні коефіцієнти готовності машин, які здійснюють окремі технологічні операції, з урахуванням тривалості операцій та впливу відмов при їх виконанні на зменшення врожайності.



$K_{Г\text{эф}}$ – ефективний коефіцієнт готовності комплексу машин; ΔK – зменшення КРБП рослин внаслідок відмов; Δk_i – зменшення КРБП рослин внаслідок відмов при виконанні i -ї технологічної операції; $k_i(t)$ – зміна КРБП рослин у часі при виконанні i -ї технологічної операції; T_i – тривалість i -ї технологічної операції; $K_{Гi}$ – еквівалентне значення коефіцієнта готовності i -ї машини; $K_{Гi}$ – коефіцієнт готовності i -ї машини; $w_j(t), \mu_j$ – параметр потоку відмов та інтенсивність відновлень j -ї машини; $w_{1n}(t), \mu_{1n}$ – параметр потоку відмов та інтенсивність відновлень n -го агрегату i -ї машини.

Рисунок 1 – Розрахунково-функціональна модель впливу відмов машин на зменшення врожаю та ефективність їх використання при технічному обслуговуванні за станом

У третьому розділі «Визначення коефіцієнта готовності як показника ефективності використання машин для рослинництва» одержані результати, що дають змогу визначати вплив відновлення машини в паузах при виконанні технологічної операції на її коефіцієнт готовності, визначати миттєве та середнє значення коефіцієнта готовності за даними про відмови та відновлення машини та здійснювати його прогнозування, а також визначати еквівалентний коефіцієнт готовності, який ураховує вплив нестационарного потоку відмов машин на КРБП рослин.

Для визначення впливу відновлення машин у планових паузах робочого циклу (коли споживач не вимагає роботи машини) на її коефіцієнт готовності обгрунтовано залежність, яка враховує частку середньої тривалості відновлення, що припадає на робочу зміну [27]:

$$K_G = \frac{T_P}{T_P + k_{PB} T_B}, \quad (1)$$

де K_G – коефіцієнт готовності; T_P – середнє напрацювання між відмовами, год; T_B – середня тривалість відновлення, год; k_{PB} – частка середньої тривалості відновлення, що припадає на робочий час.

Для спрощення використання залежності (1) перейдемо до відносних значень тривалості відновлення та робочої зміни:

$$k_C = \frac{T_C}{T_{Ц}}, \quad (2)$$

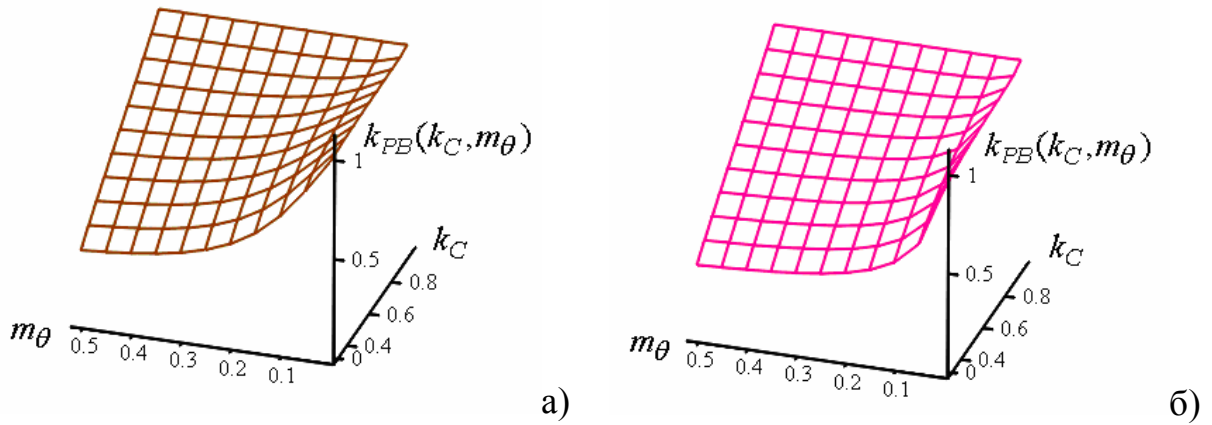
$$k_{PB} = \frac{\mathbf{M}[\tau^*]}{T_B} = \frac{T_{Ц} \mathbf{M}[\theta^*(k_C)]}{T_B}, \quad (3)$$

$$m_\theta = \frac{T_B}{T_{Ц}},$$

де k_C – частка робочої зміни у виробничому циклі; T_C – тривалість робочої зміни, год; $T_{Ц}$ – тривалість виробничого циклу, год; τ^* – частина середньої тривалості відновлення, що припадає на робочий час, год; θ^* – частина відносної тривалості відновлення, що припадає на робочий час; m_θ – математичне сподівання відносної тривалості відновлення;

Одержана методом чисельного моделювання графоаналітична залежність для визначення частки середньої тривалості відновлення, що припадає на робочий час, наведена на рис. 2 [27]. Ця залежність дає змогу аналітично досліджувати вплив відновлення машини в планових паузах на їх коефіцієнт готовності. Визначено, що частка середньої тривалості відновлення машини, що припадає на робочі зміни, наближено дорівнює частці зміни в робочому циклі, якщо середня тривалість відновлення перевищує 50% тривалості циклу (при експоненціальному розподілі тривалості відновлення).

При наявності суттєвої затримки постачання запасних частин процес відновлення доцільно розглядати як двоетапний. Аналогічні залежності для двоетапного процесу відновлення машини, який розпочинається з логістичної затримки, одержані в [26, 40].



а) при експоненціальному законі розподілу; б) при розподілі за законом Вейбула з параметром форми, що дорівнює 0,5

Рисунок 2 – Залежність частки середньої тривалості відновлення, що припадає на робочий час, від відносної тривалості зміни k_C і середньої відносної тривалості відновлення m_θ

Шляхом порівняння величин зменшення КРБП рослин при відновленні машини лише під час робочих змін з відновленням також і в паузах [27], одержано залежність для визначення частини зменшення КРБП рослин, якій можна запобігти, здійснюючи відновлення машини в планових паузах:

$$K_\delta = \frac{1}{K_G^a} - \left(1 + k \left(\frac{1}{K_G} - 1 \right) \right)^a, \quad (4)$$

де K_δ – частина зменшення КРБП рослин, якій можна запобігти, здійснюючи відновлення машини в планових паузах; a – показник ступеня в степеневій апроксимації залежності КРБП рослин від часу виконання технологічної операції.

Установлено, що чим більшим є показник ступеня в апроксимації залежності КРБП рослин від часу, тим у більшій мірі можна запобігти зменшенню врожайності, здійснюючи відновлення машин у планових паузах між робочими змінами.

Відновлення машин, робота яких призупиняється за несприятливих погодних умов, доцільно характеризувати еквівалентною тривалістю відновлення (3.34), що, на відміну від відомих визначень, дає змогу враховувати вплив мінливості погодних умов на коефіцієнт готовності машин для рослинництва [5]:

$$T_B^* = \frac{T_B}{1 + \frac{1}{(k_\theta + \mu / \theta_\Pi)}}, \quad (5)$$

де T_B^* – еквівалентна тривалість відновлення, год; k_θ – відношення інтенсивності зміни погоди зі сприятливої на несприятливу до інтенсивності зміни погоди в протилежному напрямку; μ – інтенсивність відновлень, 1/год; θ_Π – інтенсивність зміни погоди зі сприятливої на несприятливу, 1/год.

Миттєве значення коефіцієнта готовності машини в довільний момент часу визначається через похідну апроксимації залежності накопиченої тривалості відновлень від напрацювання [21, 41]:

$$K_{\Gamma}(t) = \frac{1}{1 + t'_B(t)}, \quad (6)$$

де t – напрацювання, год; t_B – накопичена тривалість відновлень, год.

Визначення (6), на відміну від відомих, дає змогу характеризувати залежність миттєвого коефіцієнта готовності від напрацювання за результатами спостереження за одиничними зразками машин.

При чисельному диференціюванні залежності накопиченої тривалості відновлень від напрацювання доцільно здійснювати її згладжування за допомогою апроксимуючої функції. Шляхом обробки літературних даних, наведених у роботах Демидка М. О., Лебедєва С. А., Орлова Н. Б., Ward S. M., Cunney M. V. і McNulty P. V., показано, що для апроксимації залежності накопиченої тривалості відновлень машин для рослинництва від напрацювання доцільно використовувати поліноми другого ступеня [30]:

$$t_B(t) = a_1 t + a_2 t^2, \quad (7)$$

$$t_B(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2, \quad (8)$$

де a_0, a_1, a_2 – параметри апроксимації залежності накопиченої тривалості відновлень від напрацювання.

Прогнозування коефіцієнта готовності можна здійснити, використовуючи в (6) екстраполяцію апроксимованої залежності накопиченої тривалості відновлень від напрацювання. При цьому доцільно використовувати поліном (8), що забезпечує меншу приведену похибку апроксимації і не ускладнює методику прогнозування. Отже, формула (6) набуває вид:

$$K_{\Gamma}(t) = \frac{1}{1 + a_1 + 2 a_2 t}. \quad (9)$$

Середнє значення коефіцієнта готовності машини на заданому інтервалі напрацювання пропонується визначити, здійснюючи усереднення миттєвих значень коефіцієнта готовності (6), обчислених на основі визначення динаміки зміни накопиченої тривалості відновлень з напрацюванням:

$$\bar{K}_{\Gamma}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} K_{\Gamma}(t) dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{1 + t'_B(t)} dt, \quad (10)$$

де \bar{K}_{Γ} – середній коефіцієнт готовності.

При використанні апроксимацій (7, 8) формула (10) набуде вид [21]:

$$\bar{K}_{\Gamma}(t_1, t_2) = \frac{\ln \left(1 + \frac{2 a_2 (t_2 - t_1)}{1 + a_1 + 2 a_2 t_1} \right)}{2 a_2 (t_2 - t_1)}. \quad (11)$$

На основі (11) одержано залежності для прогнозування середнього коефіцієнта готовності на наступні сезони робіт.

Якщо сезонне напрацювання має фіксоване значення, то середній коефіцієнт готовності на наступні сезони можна визначати за формулою [21]:

$$\bar{K}_\Gamma(n) = \bar{K}_\Gamma(t_P + (n-1)t_C, t_P + nt_C) = \frac{1}{t_C} \int_{t_P+(n-1)t_C}^{t_P+nt_C} \frac{1}{1+f'(t)} dt, \quad (12)$$

$$\bar{K}_\Gamma(1) \approx K_\Gamma(t_P) - K_\Gamma^2(t_P) a_2 t_C, \quad (13)$$

де n – номер сезону робіт, для якого здійснюється прогнозування (починаючи з першого); t_P – напрацювання машини, год; t_C – сезонне напрацювання, год;

Якщо ж сезон робіт має фіксовану тривалість, а фактичне сезонне напрацювання машини залежить лише від її технічного стану, то [21]:

$$\bar{K}_\Gamma(t_P, t_P + t_C) T_{max} = t_C, \quad (14)$$

$$\bar{K}_\Gamma(1) = \frac{t_C}{T_{max}} = \frac{K_\Gamma(t_P)}{1 + K_\Gamma(t_P)^2 T_{max} a_2}, \quad (15)$$

$$\bar{K}_\Gamma(i) = \frac{K_\Gamma(t_{P_i})}{K_\Gamma^2(t_{P_i}) T_{max} a_2 + 1}, \quad (16)$$

де T_{max} – максимальна тривалість виконання технологічної операції (з урахуванням простоїв внаслідок відмов), год.

Якщо технологічна операція виконується кількома машинами, що мають різні напрацювання й, отже, коефіцієнти готовності, то [21]:

$$T_O = \frac{T_\Sigma}{\sum_{j=1}^M (K_\Gamma(t_j))} + \frac{a_2 T_\Sigma^2 \sum_{j=1}^M (K_\Gamma^3(t_j))}{\left[\sum_{j=1}^M (K_\Gamma(t_j)) \right]^3}, \quad (17)$$

$$\bar{K}_{\Gamma j} = \frac{t_C j}{T_O} = \frac{K_\Gamma(t_j)}{1 + K_\Gamma(t_j)^2 T_O a_2}, \quad (18)$$

де T_O – тривалість виконання технологічної операції кількома машинами, год; T_Σ – сумарне напрацювання машин при виконанні технологічної операції, год; M – кількість машин; $\bar{K}_{\Gamma j}$ – середній коефіцієнт готовності j -ої машини; t_{Cj} – сезонне напрацювання j -ої машини, год; t_j – напрацювання j -ої машини на початок технологічної операції, год.

При технічному обслуговуванні машин для рослинництва за станом перед виконанням технологічної операції потік відмов є нестационарним, що унеможливає визначення КРБП рослин із застосуванням середнього коефіцієнта готовності. За цієї умови готовність машин для рослинництва доцільно характеризувати еквівалентним коефіцієнт готовності, відповідним такому самому зменшенню КРБП, але при стаціонарному потоці відмов. При лінійній залежності зменшення КРБП рослин від часу еквівалентний коефіцієнт готовності визначається за формулою [25]:

$$K_{EG}(K_M, K_G) = \frac{1}{K_M \cdot \left(\frac{1}{K_G} - 1 \right) + 1}, \quad (19)$$

де K_{EG} – еквівалентний коефіцієнт готовності; K_M – коефіцієнт впливу обслуговування машини за станом на зменшення КРБП рослин внаслідок відмов.

Залежність (19) дає змогу характеризувати ефект від обслуговування машини за станом перед технологічною операцією рослинництва відповідним збільшенням коефіцієнта готовності з урахуванням прирощення КРБП рослин.

Дослідження впливу початкового стану машин на середній КРБП рослин здійснено за допомогою ланцюгів Маркова. Визначено, що ефект від перебування всіх машин у справному стані на початку технологічної операції визначається як добуток частки машин, які знаходяться, в середньому, в нероботоздатному стані, на зміну КРБП рослин за час, що дорівнює середній тривалості відновлення [4].

У четвертому розділі «Імовірнісний аналіз впливу відмов на ефективність використання машин для рослинництва» розроблено комплекс математичних моделей, які дають змогу: визначати вплив відмов машин на числові характеристики зменшення КРБП рослин при виконанні окремих технологічних операцій та всього технологічного процесу; обчислювати еквівалентні коефіцієнти готовності машин при виконанні технологічних операцій; обчислювати ефективний коефіцієнт готовності технологічного комплексу машин і визначати ймовірність виконання технологічного процесу зі втратами, що не перевищують припустиме значення.

Еквівалентну тривалість відновлення, яка дорівнює збільшенню тривалості операції, що призводить до такого самого зменшення КРБП рослин, що й відмова, пропонується визначити з рівняння (20), що дає змогу визначити еквівалентний коефіцієнт готовності за формулою (21). При цьому зменшення КРБП рослин визначається як функція від випадкових аргументів – моменту виникнення відмови і тривалості відновлення [6]:

$$\Delta k(\varphi, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T k(t) dt - \frac{1}{T + \tau_E} \int_0^{T + \tau_E} k(t) dt, \quad (20)$$

$$K_{EG} = \frac{T}{T + \tau_E}, \quad (21)$$

де Δk – зменшення КРБП рослин внаслідок відмови; φ – відносна частка обробленої площі на момент виникнення відмови; τ – тривалість відновлення, год; T – тривалість технологічної операції, год; τ_E – еквівалентна тривалість відновлення, год.

Для лінійної спадаючої залежності КРБП рослин від часу одержані наступні залежності для визначення зменшення КРБП рослин внаслідок відмови, еквівалентного коефіцієнта готовності та числових характеристик зменшення КРБП рослин (при рівномірному розподілі відмов) [6, 15]:

$$\Delta k(\varphi, \tau) = \tau k_1 (1 - \varphi), \quad (22)$$

$$\tau_E = 2\tau (1 - \varphi), \quad (23)$$

$$K_{EG} = \frac{T}{T + 2\tau (1 - \varphi)} , \quad (24)$$

$$\mathbf{M}[\Delta k] = \frac{k_1 \mathbf{M}[\tau]}{2} , \quad (25)$$

$$v_{\Delta k}(v_\tau) = \sqrt{\frac{4v_\tau^2 + 1}{3}} , \quad (26)$$

де k_1 – коефіцієнт пропорційності в лінійній залежності КРБП рослин від часу виконання технологічної операції, 1/год; $v_{\Delta k}$ – коефіцієнт варіації зменшення КРБП рослин внаслідок відмови; v_τ – коефіцієнт варіації тривалості відновлення.

Аналогічні залежності для спадаючої квадратичної залежності КРБП рослин від часу виконання технологічної операції мають вид [15]:

$$\Delta k(\varphi, \tau) = k_2 \tau (1 - \varphi) (\tau + T(1 + \varphi)) , \quad (27)$$

$$\tau_E = \frac{3\tau(1 - \varphi^2)}{2} ,$$

$$K_{EG} = \frac{T}{T + 1,5\tau(1 - \varphi^2)} , \quad (28)$$

$$v_{\Delta k}(v_\tau) = \sqrt{\frac{6v_\tau^2 + 1}{5}} . \quad (29)$$

Для спадаючої степеневій залежності КРБП рослин від часу виконання технологічної операції одержано [18]:

$$\Delta k(\tau, \varphi) = k_a \tau T^{a-1} (1 - \varphi^a) . \quad (30)$$

де a – показник ступеня в степеневій апроксимації залежності КРБП рослин від часу виконання технологічної операції.

Залежності для визначення зменшення КРБП рослин внаслідок відмови при опуклій лінійній, степеневій і квадратичній залежностях КРБП рослин від часу одержані в [18, 28, 39], а при наявності інтервалу сталого значення КРБП рослин і подальшого лінійного зменшення із часом – у [50].

Аналіз впливу показників надійності та ремонтпридатності машини на числові характеристики зменшення КРБП рослин при довільній кількості відмов під час виконання технологічної операції здійснено із застосуванням методу математичної індукції. Для лінійної спадаючої залежності КРБП рослин від часу одержані наступні залежності для визначення числових характеристик зменшення КРБП рослин (при нестационарному потоці відмов) [22]:

$$\mathbf{M}[\Delta k] = k_1 \mathbf{M}[\omega] \mathbf{M}[\tau] w^* T , \quad (31)$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{w^* T} \cdot (v_\tau^2 + 1) \cdot (v_\omega^2 + 1)} , \quad (32)$$

де w^* – еквівалентне значення параметра потоку відмов, 1/год; ω – частка площі поля, яка лишилась необробленою при виникненні відмови; v_ω – коефіцієнт варіації частки площі поля, яка лишилась необробленою при виникненні відмови.

Оскільки залежності (31, 32) враховують числові характеристики частки площі поля, яка залишилась необробленою при настанні відмови машин, їх можна використовувати при стаціонарному та нестаціонарному потоках відмов.

Дослідження впливу відмов машин на виконання технологічного процесу з кількох операцій здійснено, виходячи з відомої мультиплікативної форми представлення КРБП рослин, яка після логарифмування набуває вид [7]:

$$\ln \kappa_{ТП} = \sum_{i=1}^{N_{OT}} \ln \kappa_i, \quad (33)$$

де $\kappa_{ТП}$ – складова КРБП рослин, обумовлена відмовами машин при виконанні технологічного процесу; N_{OT} – кількість операцій у технологічному процесі; κ_i – КРБП рослин при виконанні i -ї технологічної операції.

Отже, складову КРБП рослин за результатами виконання технологічного процесу, на яку впливають відмови машин, можна розглядати як таку, що розподілена за логарифмічно-нормальним законом, а її числові характеристики визначати за формулами [7]:

$$\mathbf{M}[\kappa_i] = 1 - \mathbf{M}[\Delta\kappa_i], \quad (34)$$

$$\mathbf{D}[\kappa_i] = \mathbf{D}[1 - \Delta\kappa_i] = \mathbf{D}[\Delta\kappa_i], \quad (35)$$

$$\mathbf{M}[\kappa_{ТП}] = \prod_{i=1}^{N_{OT}} \mathbf{M}[\kappa_i], \quad (36)$$

$$v_{ТП} = \sqrt{\prod_{i=1}^{N_{OT}} (v^2(\kappa_i) + 1)} - 1, \quad (37)$$

де $v_{ТП}$ – коефіцієнт варіації зменшення КРБП рослин при виконанні технологічного процесу.

Це дає змогу сформулювати критерій відповідності системи технічного обслуговування комплексу машин для рослинництва виробничому завданню, виходячи зі співвідношення між імовірністю зменшення КРБП рослин внаслідок відмов нижче припустимого рівня (39) і допустимою ймовірністю такої події [7]:

$$\varepsilon_{\Delta K} = 1 - \frac{\kappa_{\min}}{\mathbf{M}[\kappa_{ТП}]}, \quad (38)$$

$$p_{ТП} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{Erf} \left(\frac{\ln(1 - \varepsilon_{\Delta K}) + \ln \sqrt{v_{ТП}^2 + 1}}{\sqrt{2 \ln(v_{ТП}^2 + 1)}} \right), \quad (39)$$

де $\varepsilon_{\Delta K}$ – допустиме відносне зменшення КРБП рослин внаслідок відмов; κ_{\min} – мінімально-допустиме значення КРБП рослин за результатами технологічного процесу; $p_{ТП}$ – імовірність того, що КРБП рослин за результатами технологічного процесу виявиться не меншим, ніж припустиме значення;

Графік залежності (39) наведено на рис. 3.

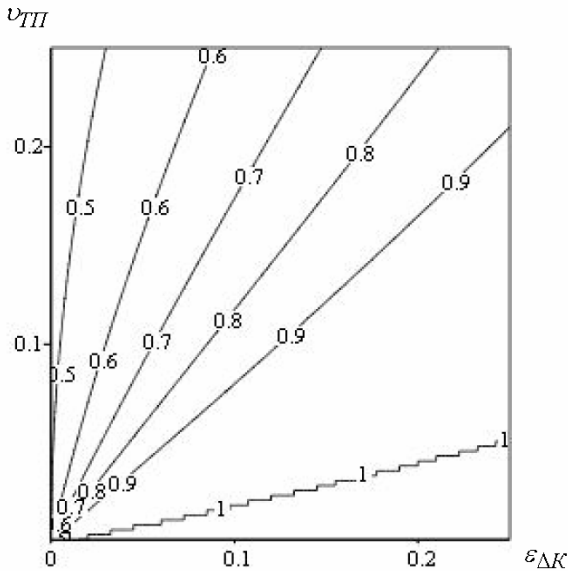


Рисунок 3 – Залежність імовірності виконання технологічного процесу від допустимого відносного зменшення КРБП рослин і коефіцієнта варіації КРБП рослин за результатами виконання технологічного процесу.

У п'ятому розділі «Дослідження впливу обслуговування машини за станом перед технологічною операцією рослинництва на еквівалентний коефіцієнт готовності» розроблено комплекс математичних моделей, які дають змогу визначати вплив нестаціонарного потоку відмов на показники виконання технологічної операції [22]:

$$K_n = \frac{\mathbf{M}[n^*]}{\mathbf{M}[n]}, \quad (41)$$

$$K_M = \frac{\mathbf{M}[\Delta\kappa_p]}{\mathbf{M}[\Delta\kappa]} = \frac{2\mathbf{M}[\omega]w^*}{w_0}, \quad (42)$$

$$K_v = \frac{v_p}{v_{\Delta\kappa}} = \sqrt{\frac{3w_0 \cdot (v_\omega^2 + 1)}{4w^*}}, \quad (43)$$

де K_n – коефіцієнт впливу обслуговування машини за станом на кількість відмов машини; n^* – кількість відмов при обслуговуванні за станом перед технологічною операцією; n – кількість відмов машини при вихідному потоці відмов; $\Delta\kappa_p$ – зменшення КРБП рослин при обслуговуванні за станом перед технологічною операцією; w_0 – вихідне значення параметра потоку відмов, 1/год; K_v – коефіцієнт впливу обслуговування за станом на коефіцієнт варіації КРБП рослин; v_p – коефіцієнт варіації зменшення КРБП рослин при обслуговуванні за станом.

Ефективний коефіцієнт готовності технологічного комплексу машин для рослинництва, призначений для порівняння систем технічного обслуговування таких комплексів, визначається з (34, 36) з урахуванням (25) та еквівалентних коефіцієнтів готовності машин [25]:

$$K_{Г\text{еф}} = 1 - \sum_{i=1}^{N_{OT}} \left(\frac{k_{1i} T_i}{\sum_{n=1}^{N_{OT}} k_{1n} T_n} \cdot (1 - K_{EG i}) \right), \quad (40)$$

де $K_{Г\text{еф}}$ – ефективний коефіцієнт готовності комплексу машин; k_{1i} – коефіцієнт пропорційності в лінійній залежності КРБП рослин від часу виконання i -ї технологічної операції, 1/год; T_i – тривалість виконання i -ї технологічної операції, год.

Визначивши вплив обслуговування за станом на КРБП рослин (42), можна обчислити еквівалентний коефіцієнт готовності за формулою (19). При дослідженні застосовували кусково-лінійні (з однією зростаючою ділянкою) апроксимації зміни параметра потоку відмов у часі та спадаючу лінійну апроксимацію залежності КРБП рослин від часу виконання операції (наприклад, див. рис. 4). При застосуванні залежностей (41–43) до кусково-лінійної апроксимації зміни параметра потоку відмов, наведеної на рис. 4, одержані залежності (44–46) [22]:

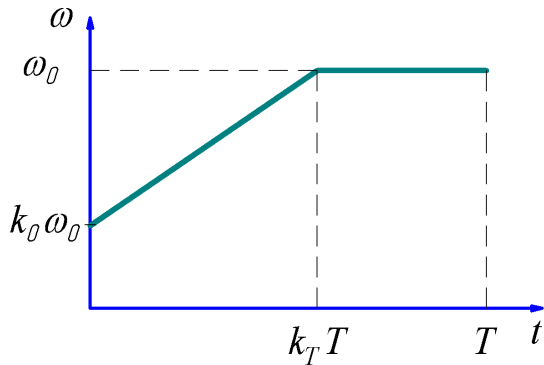


Рисунок 4 – Апроксимація зміни параметра потоку відмов у часі

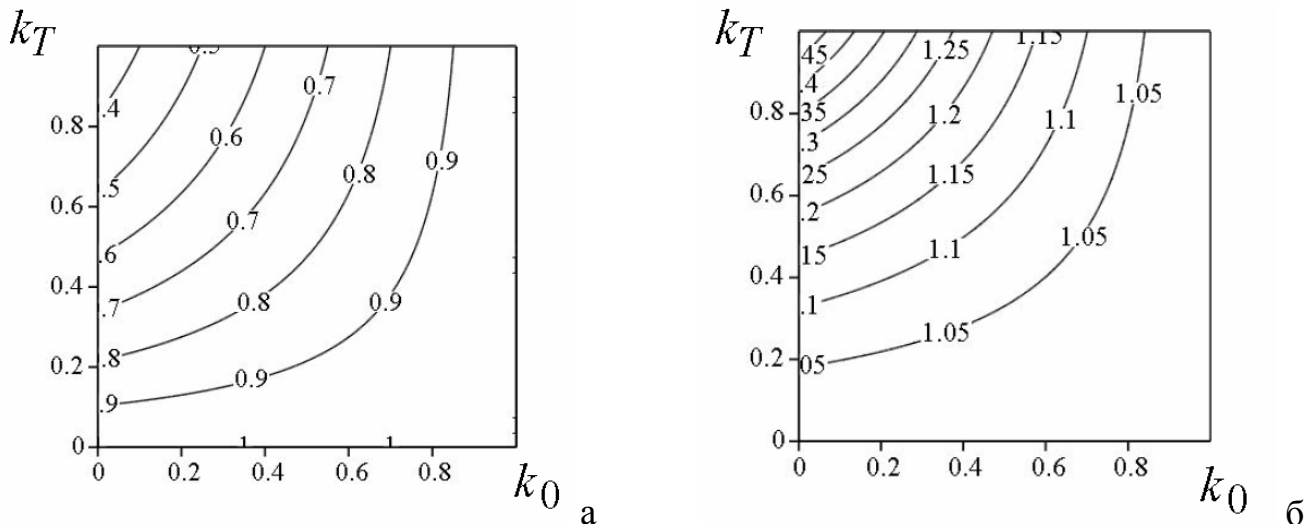
$$K_n = \frac{2 - k_T + k_0 k_T}{2}, \quad (44)$$

$$K_M = 1 - k_T k_0^* + \frac{k_T^2 k_0^*}{3}, \quad (45)$$

$$k_0^* = 1 - k_0,$$

$$K_v = \sqrt{\frac{9(4 - k_T^3 k_0^* + 4k_T^2 k_0^* - 6k_T k_0^*)}{4(k_T^2 k_0^* - 3k_T k_0^* + 3)^2}}. \quad (46)$$

Графіки залежностей (45, 46) наведено на рис. 5



а – коефіцієнт впливу обслуговування за станом на зменшення КРБП рослин внаслідок відмов, б – коефіцієнт варіації зменшення КРБП рослин
Рисунок 5 – Залежності відносних змін параметрів, які характеризують КРБП рослин, від параметрів, які характеризують зміну потоку відмов у часі

Отже, як слідує з рис. 5, технічне обслуговування машин за станом перед технологічною операцією підвищує коефіцієнт варіації КРБП рослин, що обумовлюється збільшенням коефіцієнта варіації частки площі поля, обробленої до настання відмови [22].

У шостому розділі «Оптимізація параметрів технічного обслуговування агрегатів машин для рослинництва при наявності інкубаційного етапу розвитку дефекту та визначення еквівалентного коефіцієнта готовності» одержано залежності, що дають змогу мінімізувати сукупні виробничі витрати при обслуговуванні за станом.

Передумовою вирішення поставлених завдань є дослідження впливу обслуговування за станом на потік відмов при наявності інкубаційного етапу розвитку дефекту і відсутності даних про попередній стан агрегату. Часова діаграма, що ілюструє досліджуваний процес, наведена на рис. 6 (прийемо, що діагностування відбувається в момент часу $t = 0$). Уважатимемо, що по завершенні інкубаційного етапу починається стрімкий розвиток дефекту. Моментом виникненням дефекту, для стислості, називатимемо момент, коли дефект досягає певного розміру D_B (меншого, ніж поріг коригувальної заміни D_H). Використаємо наступну модель технічного обслуговування агрегату за станом і настання відмов [16, 42]: потік дефектів, що виникають, є стаціонарним; дефект може виникнути до діагностування або після нього; розмір дефекту зростає з певною випадковою швидкістю (параметр, який характеризує цю швидкість, лишається незмінним протягом усього часу розвитку дефекту); якщо при діагностуванні розмір дефекту перевищує поріг превентивної заміни D_D , агрегат замінюють на новий; якщо розмір дефекту досягає порога коригувальної заміни D_H , то настає відмова в момент часу t_H , після якої агрегат замінюють на новий.

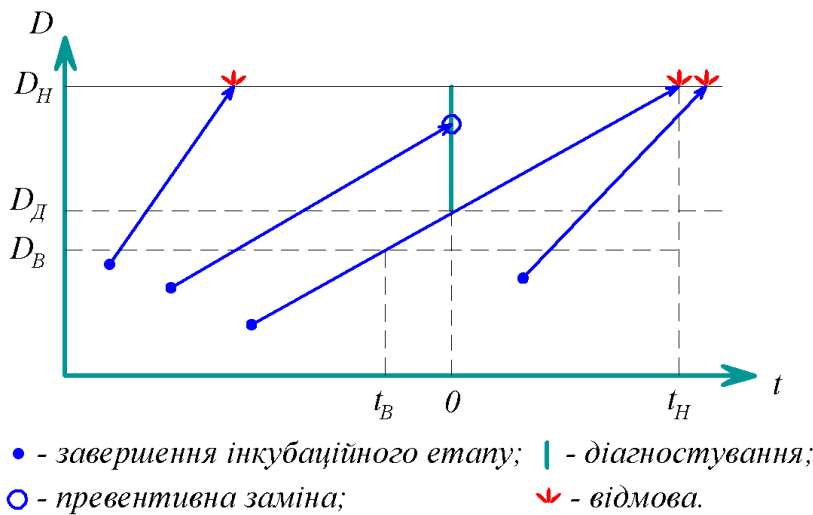


Рисунок 6 – Часова діаграма процесів виникнення дефектів та їх розвитку, діагностування агрегатів, їх превентивної заміни та настання відмов.

Дослідження здійснено шляхом визначення ймовірностей подій, які призводять до виникнення дефекту через певний час після діагностування, з урахуванням розподілу швидкості розвитку дефекту. При зміні розміру дефекту за лінійним законом і логарифмічно нормальним розподілом швидкості розвитку дефекту одержано залежність для відносного значення параметра потоку відмов, яке характеризує зменшення зазначеного параметра порівняно зі сталим значенням [16, 42]:

$$D(t) = D_B + V(t - t_B) \quad , \quad t > t_B \quad , \quad (47)$$

$$k_W(t) = \frac{w(t)}{w_0} = \frac{1}{2} + \Phi_0 \left(\frac{\ln \left(\frac{m_V t}{D_H - D_D} \right)}{\sigma_V} \right) \quad , \quad (48)$$

де w – параметр потоку відмов, 1/год; D – розмір дефекту; D_B – розмір дефекту на момент виникнення; t – час, год; t_B – час виникнення дефекту, год; V – швидкість розвитку дефекту; k_W – відносне значення параметра потоку відмов; D_H – розмір дефекту при настанні відмови (порог коригувальної заміни); D_D – поріг превентивної заміни; m_V і σ_V – відповідно, параметр масштабу і параметр форми логарифмічно нормального розподілу швидкості розвитку дефекту.

Аналогічна залежність одержана і при зміні розміру дефекту за експоненціальним законом (при цьому приймаємо, що розподіл швидкості збільшення логарифму розміру дефекту є логарифмічно нормальним) [16]:

$$\ln D(t) = \ln D_B + V(t - t_B) \quad , \quad (49)$$

$$t_{rel} = \frac{t}{\mathbf{M}[\tau_L] \ln \frac{D_H}{D_D}} \quad , \quad (50)$$

$$k_W(t_{rel}, v_V) = \frac{1}{2} + \Phi_0 \left(\frac{\ln \frac{t_{rel}}{1 - v_V^2}}{\sqrt{\ln(1 + v_V^2)}} \right) \quad , \quad (51)$$

де t_{rel} – відносний час; τ_L – стала часу розвитку дефекту, год; v_V – коефіцієнт варіації швидкості розвитку дефекту.

Залежність (51) використана при оптимізації порогу превентивної заміни при обслуговуванні за станом перед технологічною операцією та при оптимізації періодичності технічного обслуговування агрегатів машин за станом [19, 34]. Графік залежності (51) наведено на рис. 7.

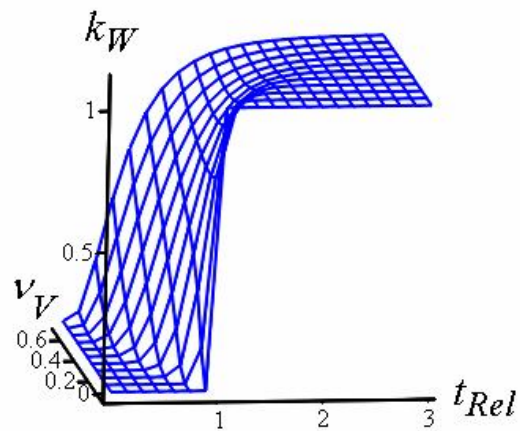


Рисунок 7 – Залежність відносного значення параметра потоку відмов від наробітку після обслуговування за станом і коефіцієнта варіації швидкості розвитку дефекту.

При дослідженнях з оптимізації обслуговування перед технологічною операцією агрегатів, відмови яких спричинені дефектами з тривалим інкубаційним етапом і розвитком за експоненціальним законом, у якості управляючого параметра обслуговування за станом доцільно використовувати безрозмірний комплекс – відносний середній залишковий ресурс після перевищення порога превентивної заміни [23]:

$$\Theta = \frac{\mathbf{M}[\tau_L] \ln \frac{D_H}{D_D}}{T}, \quad (52)$$

де Θ – управляючий параметр обслуговування за станом; T – тривалість технологічної операції, год.

Це дає змогу зменшити кількість аргументів залежності для визначення відносного значення параметра потоку відмов від частки обробленої площі поля [23]:

$$k_W(\varphi, \Theta, v_V) = \frac{1}{2} + \Phi_0 \left(\frac{\ln \left(\frac{\varphi}{\Theta(1 - v_V^2)} \right)}{\sqrt{\ln(1 + v_V^2)}} \right). \quad (53)$$

Середній невикористаний ресурс агрегатів при обслуговуванні за станом визначено за умови, що параметр потоку відмов практично поновлюється до сталого значення на інтервалі між обслуговуваннями. При зміні розміру дефекту за лінійним законом і логарифмічно нормальному розподілі швидкості збільшення розміру дефекту, невикористаний ресурс визначається за формулою [29, 34]:

$$\bar{T}_H = \sqrt{1 + v_V^2} \frac{D_H - D_D}{2m_V}, \quad (54)$$

де \bar{T}_H – середній невикористаний ресурс, год.

При зміні розміру дефекту за експоненціальним законом (розподіл швидкості збільшення логарифму розміру дефекту є логарифмічно нормальним) невикористаний ресурс визначається [29, 34]:

$$\bar{T}_H = \mathbf{M}[\tau_L] \frac{(1 - v_V^2) \sqrt{1 + v_V^2}}{2} \cdot \ln \frac{D_H}{D_D}. \quad (55)$$

На основі (22) одержано залежності для визначення впливу управляючого параметра обслуговування за станом на КРБП рослин [23]:

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa_C(\Theta)] = k_1 \mathbf{M}[\tau] (1 - \mathbf{M}[\varphi(\Theta)]), \quad (56)$$

$$\mathbf{M}[\varphi(\Theta)] = \frac{\int_0^1 \varphi f_\varphi(\varphi, \Theta) d\varphi}{\int_0^1 k_W(\varphi, \Theta, v_V) d\varphi} = \frac{\int_0^1 \varphi k_W(\varphi, \Theta, v_V) d\varphi}{\int_0^1 k_W(\varphi, \Theta, v_V) d\varphi}, \quad (57)$$

$$f_\varphi(\varphi, \Theta) = \frac{k_W(\varphi, \Theta, v_V)}{\int_0^1 k_W(\varphi, \Theta, v_V) d\varphi}, \quad (58)$$

де $\Delta\kappa_C$ – зменшення КРБП рослин внаслідок відмови агрегату, який обслуговують за станом; f_φ – щільність ймовірності частки площі поля, обробленої до відмови.

Ефективність технічного обслуговування за станом у порівнянні з коригувальним обслуговуванням охарактеризуємо відношенням відповідних середніх виробничих витрат [23, 36]:

$$K_{CK}(\Theta) = \frac{z_C(\Theta)}{z_K} = \frac{z_{CY}(\Theta) + z_{C3}(\Theta)}{z_K} + \frac{z_D}{z_K}, \quad (59)$$

$$z_C(\Theta) = z_{CY}(\Theta) + z_{C3}(\Theta) + z_D, \quad (60)$$

$$z_K = z_{KY} + z_{K3}, \quad (61)$$

де K_{CK} – співвідношення витрат при технічному обслуговуванні за станом і коригувальному обслуговуванні; z_C – середні сумарні виробничі витрати при технічному обслуговуванні агрегату за станом, грн; z_{CY} – середнє зменшення врожаю внаслідок відмов при технічному обслуговуванні агрегату за станом, грн; z_{C3} – витрати на заміну агрегату при технічному обслуговуванні за станом, грн; z_K – середні сумарні виробничі витрати при коригувальному обслуговуванні агрегату, грн; z_{KY} – середнє зменшення врожаю внаслідок відмов при коригувальному обслуговуванні агрегату, грн; z_{K3} – витрати на заміну агрегату при коригувальному обслуговуванні, грн; z_D – витрати на діагностування агрегату, грн.

Витрати, що входять у (60, 61), визначаються за формулами [23]:

$$z_{CY}(\Theta) = C_Y P_C(\Theta) \mathbf{M}[\Delta\kappa_C(\Theta)], \quad (62)$$

$$z_{C3}(\Theta) = P_3(\Theta) C_{A2p} k_{AC} + P_C(\Theta) (1 - P_3(\Theta)) C_{A2p} k_{AK}, \quad (63)$$

$$z_K = P_K C_Y \mathbf{M}[\Delta\kappa_K] + P_K C_{A2p} k_{AK}, \quad (64)$$

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa_K] = \frac{k_1 \mathbf{M}[\tau]}{2}, \quad (65)$$

де C_Y – вартість врожаю при відсутності відмови, грн; P_C – ймовірність відмови при технічному обслуговуванні агрегату за станом; P_3 – ймовірність превентивної заміни агрегату; C_{A2p} – вартість агрегату, грн; k_{AC} – коефіцієнт, що враховує вартість робіт при превентивній заміні агрегату; k_{AK} – коефіцієнт, що враховує вартість робіт по заміні агрегату при коригувальному обслуговуванні; P_K – ймовірність відмови агрегату при коригувальному обслуговуванні; $\Delta\kappa_K$ – зменшення КРБП рослин внаслідок відмови агрегату при коригувальному обслуговуванні.

Ймовірності подій, які входять у (62–64), визначаються за формулами [23]:

$$P_K \approx 1 - \exp(-w_0 T) \approx w_0 T, \quad (66)$$

$$P_C(\Theta) \approx 1 - \exp\left(-\int_0^1 w_0 T k_w(\varphi, \Theta, v_V) d\varphi\right) \approx w_0 T \int_0^1 k_w(\varphi, \Theta, v_V) d\varphi, \quad (67)$$

$$P_3(\Theta) = w_0 \mathbf{M}[\tau_L] \ln \frac{D_H}{D_D}, \quad (68)$$

Задача оптимізації управляючого параметра обслуговування за станом сформульована на основі співвідношення витрат (59):

$$\begin{cases} K_{CK}(\Theta) \rightarrow \min \Rightarrow \Theta_{Opt} \\ K_{CK}(\Theta_{Opt}) < 1 \end{cases}, \quad (69)$$

де Θ_{Opt} – оптимальне значення управляючого параметра обслуговування за станом.

Відповідне оптимальне значення порогу превентивної заміни можна обчислити, використовуючи (52). Графічні залежності для визначення оптимального значення управляючого параметра обслуговування за станом і відповідного найменшого співвідношення витрат (59) наведено на рис. 8 [23]. В якості аргументів цієї залежності використано наступні безрозмірні комплекси:

$$k_{KC} = \frac{k_{AK}}{k_{AC}}, \quad (70)$$

$$c_A = \frac{C_{Aзр} k_{AC}}{C_{yM}[\Delta k_K]}, \quad (71)$$

де k_{KC} – співвідношення витрат на заміну агрегату при коригувальному обслуговуванні та превентивній заміні; c_A – відносна вартість агрегату.

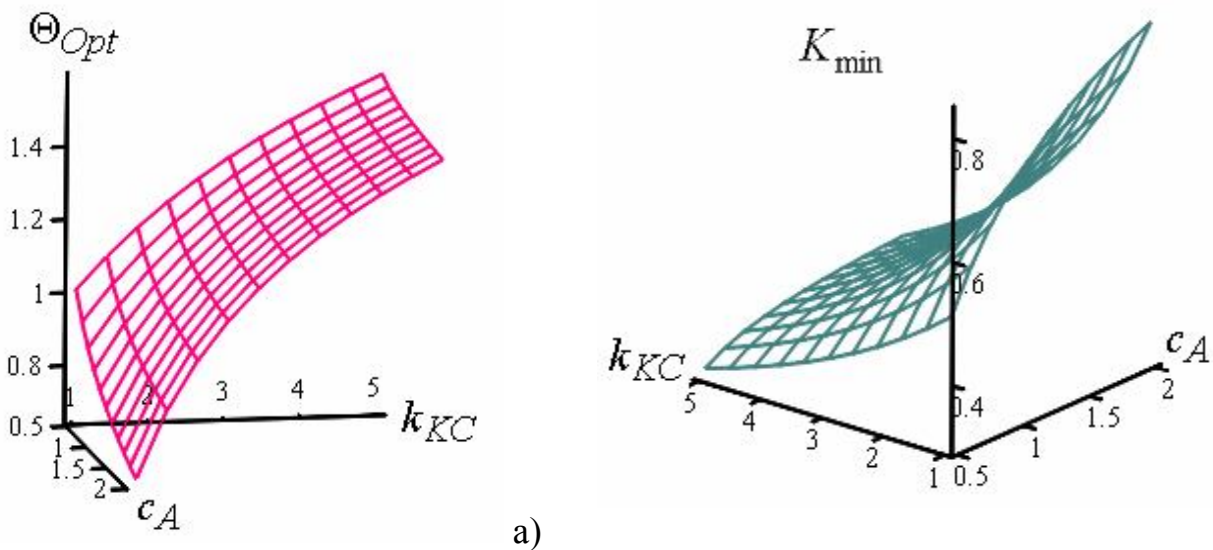


Рисунок 8 – Залежності для визначення оптимального значення управляючого параметра обслуговування за станом (а) і відповідного співвідношення витрат при обслуговуванні за станом і коригувальному обслуговуванні (б) (при коефіцієнті варіації швидкості збільшення розміру дефекту, що дорівнює 0,5)

На основі (42, 56, 65) одержано залежності для визначення впливу обслуговування агрегату за станом перед технологічною операцією на середній КРБП ролин і еквівалентний коефіцієнт готовності:

$$K_M(\Theta) = 2(1 - \mathbf{M}[\varphi(\Theta)]) \frac{P_C(\Theta)}{P_K}, \quad (72)$$

$$K_{EG}(\Theta) = \frac{1}{1 + 2(1 - \mathbf{M}[\varphi(\Theta)]) \frac{P_C(\Theta)}{P_K} \cdot \left(\frac{1}{K_\Gamma} - 1 \right)}. \quad (73)$$

Формули (72, 73) призначені для застосовування за умови, що діагностична ознака є прямо пропорційною розміру дефекту. Якщо ж це не так, то формули (67, 72, 73) необхідно перетворити з урахуванням відповідної залежності (74):

$$D = f_{AE}(d), \quad (74)$$

$$P_C(d_D) \approx w_0 T \int_0^1 k_w(\varphi, \Theta(f_{AE}(d_D), f_{AE}(d_H)), v_V) d\varphi, \quad (75)$$

$$K_M(d_D) = 2(1 - \mathbf{M}[\varphi(\Theta(f_{AE}(d_D), f_{AE}(d_H))))] \frac{P_C(d_D)}{P_K}, \quad (76)$$

$$K_{EG}(d_D) = \frac{1}{1 + 2(1 - \mathbf{M}[\varphi(\Theta(f_{AE}(d_D), f_{AE}(d_H))))] \frac{P_C(d_D)}{P_K} \cdot \left(\frac{1}{K_\Gamma} - 1 \right)}, \quad (77)$$

де f_{AE} – залежність розміру дефекту від акустико-емісійної діагностичної ознаки; d – значення акустико-емісійної діагностичної ознаки; d_H – значення акустико-емісійної діагностичної ознаки при настанні відмови; d_D – допустиме значення акустико-емісійної діагностичної ознаки (поріг превентивної заміни).

У сьомому розділі «Акустико-емісійне діагностування трибосистем агрегатів машин для рослинництва» наведені результати досліджень, спрямованих на обґрунтування акустико-емісійних діагностичних ознак, інваріантних до масштабування сигналу акустичної емісії (АЕ) по амплітуді, та розробку і впровадження технологічного процесу акустико-емісійного діагностування підшипникових вузлів кочення машин для рослинництва.

При експериментальних дослідженнях акустичної емісії вузлів машин для рослинництва використовувалась система реєстрації сигналів акустичної емісії, яка складається з датчика акустичної емісії GT300, підсилювача, USB-осцилографа PV6501 і комп'ютера – див. рис 9. Датчик установлювали за допомогою гумової накладки і магнітів. Для забезпечення акустичного контакту датчика з об'єктом використовували консистентне мастило «Литол-24». Підсилювач складається з вхідного каскаду – перетворювача «струм–напруга» з низьким рівнем власного шуму, Основним призначенням цього перетворювача є електричне узгодження датчика емісії з наступними каскадами підсилювача. Далі сигнал надходить в підсилювач з регульованим коефіцієнтом передачі (чотири можливих значення підсилення, співвідношення максимального до мінімального – 10-кратне) і смуговий фільтр (середня частота дорівнює 63 кГц, ширина смуги пропускання – 16 кГц) [9, 48].

Дослідження впливу прогріву підшипникових вузлів зернозбиральних комбайнів, а також демонтажу та встановлення датчика акустичної емісії на його вихідний сигнал здійснювались на підшипникових вузлах молотильного барабана комбайна СК-5М-1, клавіш соломотрясу комбайна LEXION 670 і приводу шківів комбайна Дон-1500.



а)

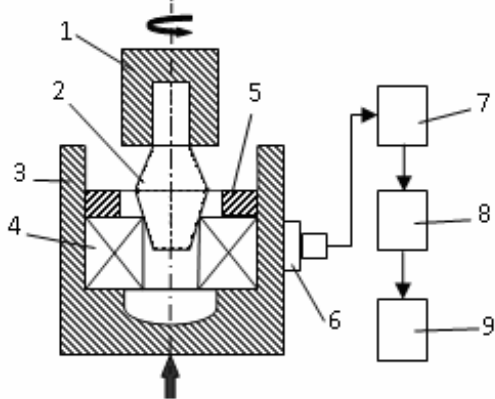


б)

а) – дослідження комбайну LEXION 670 , б) – дослідження комбайну ДОН-1500
Рисунок 9 – Система реєстрації сигналів акустичної емісії

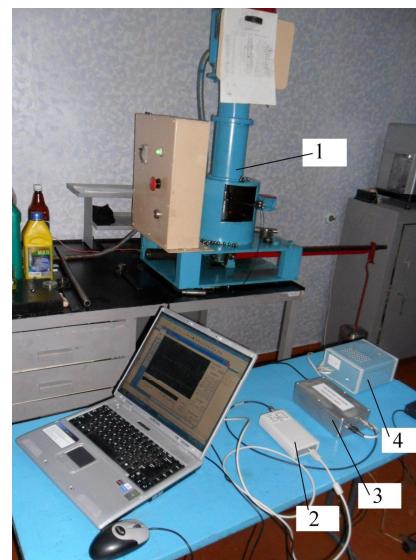
Результати статистичної обробки відповідних сигналів акустичної емісії, здійсненої із застосуванням критерію Уїлкоксона-Манна-Уїтні та критерію Краскала-Уолліса, свідчать про вплив прогріву підшипникових вузлів, а також демонтажу та встановлення датчика акустичної емісії на середньоквадратичне значення обвідної струму датчика. Це дає змогу зробити висновок про доцільність використання діагностичних ознак, інваріантних до масштабування сигналу емісії по амплітуді.

Комп'ютеризований стенд для дослідження акустико-емісійних діагностичних ознак дефектів трибосистем кочення створено на основі чотирьохкулькової машини тертя [1, 48]. Стенд дає змогу здійснювати дослідження як радіальних, так і упорних підшипників кочення. Структуру стенду при дослідженні діагностичних ознак дефектів радіальних підшипників кочення показано на рис. 10, а загальний вигляд – на рис. 11.



1 – шпindel чотирьохкулькової машини тертя; 2 – конус; 3 – корпус змінного підшипникового вузла; 4 – підшипник; 5 – гайка; 6 – датчик; 7 – підсилювач; 8 – USB-осцилограф; 9 – комп'ютер

Рисунок 10 – Структура стенду при дослідженні діагностичних ознак дефектів радіальних підшипників кочення.



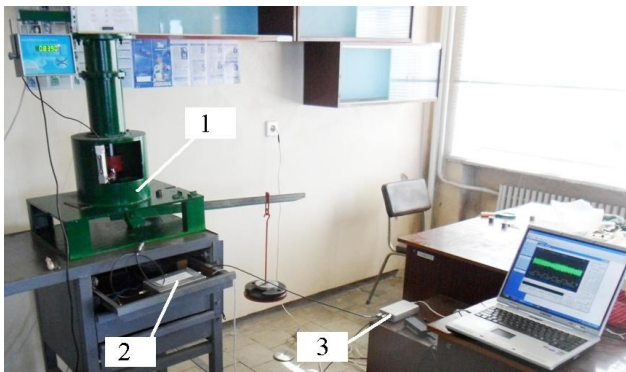
1 – чотирьохкулькова машина тертя; 2 – USB-осцилограф; 3 – підсилювач; 4 – джерело живлення

Рисунок 11 – Загальний вигляд стенду для дослідження діагностичних ознак дефектів підшипників кочення.

Номінальна частота обертання рухомого кільця – 1460 1/хв. Структура стенду при дослідженні діагностичних ознак дефектів упорних підшипників кочення наведена в [11].

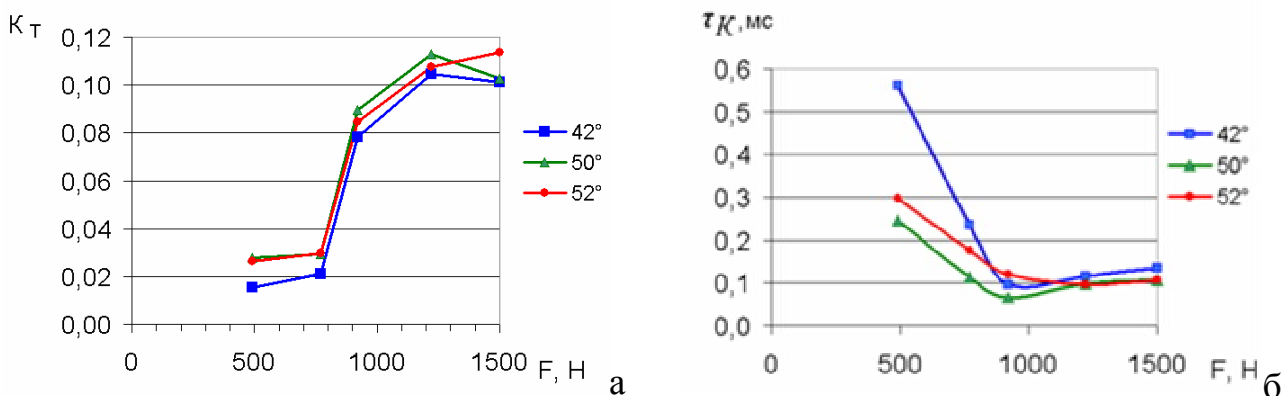
Дослідження трибосистем ковзання здійснювались на стенді [14], створеним на основі машини тертя для випробування зразків за схемою «кільце-кільце», тензодатчика ZEMIC L6E3 і цифрового пристрою «Сателіт» (з інтерфейсом RS-232C) та елементів реєстрації акустичної емісії, які застосовані в [9] – див. рис. 12.

Як обґрунтовано в [10], перспективні діагностичні ознаки повинні бути інваріантними до масштабування сигналу акустичної емісії по амплітуді, неінваріантними до зміни порядку слідування відліків сигналу в часі, бути достатньо стійкими до імпульсних завад, не потребувати значних обчислювальних ресурсів і характеризуватися високим ступенем стискання вимірювальної інформації.



1 – машина тертя, 2 – підсилювач сигналу акустичної емісії; 3 – USB-осцилограф
Рисунок 12 – Загальний вигляд стенда для досліджень трибосистем ковзання

Експериментальні дослідження з акустико-емісійного діагностування трибосистем ковзання здійснені на прикладі матеріалів, що використовуються в гідроприводі ГСТ-90 – високоміцного чавуну ВЧ500-3 і латуні ЛМцСКА 58-2-2-1-1 у середовищі гідравлічної оливи МГЕ-46В при швидкості ковзання 0,5 м/с. Як видно з рис. 13, залежність інтервалу кореляції від номінального тиску має екстремум.



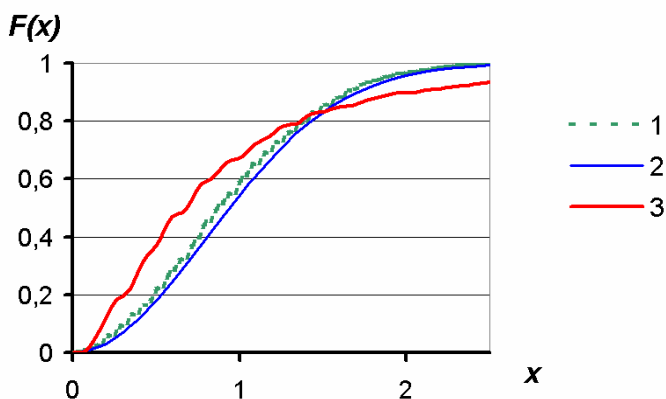
а – коефіцієнт тертя; б – інтервал кореляції обвідної акустичної емісії.

Рисунок 13 - Залежність параметрів режиму тертя і сигналу емісії від навантаження.

Це дає змогу діагностувати трибосистеми ковзання за співвідношенням між напрямом зміною інтервалу кореляції обвідної вузькосмугового сигналу акустичної емісії та напрямом зміни навантаження [14]. Якщо зміна навантаження (наприклад, збільшення) призводить до зміни інтервалу кореляції в тому ж напрямку,

то має місце тертя в умовах граничного змащення. Цей діагностичний параметр є інваріантним до масштабування сигналів акустичної емісії по амплітуді.

Теоретичними та експериментальними дослідженнями доведено, що порівняння емпіричного закону розподілу обвідної вузько-смугового сигналу акустичної емісії підшипника та закону розподілу Релея за допомогою критерію згоди Крамера-Мізеса-Смірнова дає змогу здійснювати контроль режиму змащення підшипника кочення (при цьому діагностичним параметром є значення статистики зазначеного критерію). Експериментальні дослідження здійснювали на стенді [9, 48] (див. рис. 7), у змінній підшипниковій вузол якого встановлювався упорний шарикопідшипник 8100, при роботі у двох режимах змащення - змішаному (пружно-гідродинамічному) режимі при початковому стані масла М10Г2к і в режимі граничного змащування після «старіння» масла (спрацьовування присадок і зменшення в'язкості внаслідок термодеструкції). Навантаження становило 258 Н. На рис. 14 зображені відповідні інтегральні закони розподілу сигналів емісії (попередньо здійснювалось масштабування сигналів так, щоб вони мали одиничні математичні сподівання). Для порівняння, на цьому ж рисунку показано також інтегральний закон розподілу Релея. Діагностичний параметр дорівнював 0,38 при початковому стані мастила та 57 після його «старіння» і термодеструкції.



1 – розподіл при пружно-гідродинамічному режимі змащення, 2 – розподіл Релея, 3 – розподіл при терті в умовах граничного змащення

Рисунок 14 – Інтегральні закони розподілу миттєвих значень обвідної акустичної емісії підшипника

Діагностування підшипників кочення за нерівномірністю розподілу сигналів акустичної емісії в часі ґрунтується на наступних положеннях. За умови відсутності дефектів на контактуючих поверхнях деталей підшипника і сталого режиму роботи, час надходження сигналів акустичної емісії бездефектного підшипника є випадковою величиною, рівномірно розподіленою на інтервалі дослідження. Контакткування деталей на дефектних ділянках втомного руйнування призводить до збільшення активності акустичної емісії у відповідні моменти часу [10, 11].

Отже, емпірична інтегральна функція розподілу часу реєстрації сигналів акустичної емісії відрізнятиметься від гіпотетичної інтегральної функції рівномірного розподілу тим більше, чим більше розвинені дефекти на контактуючих поверхнях [35].

Відповідність фактичного розподілу часу надходження сигналів акустичної емісії гіпотетичному розподілу пропонується перевіряти за критерієм згоди Колмогорова [11] або за критерієм згоди Крамера-Мізеса-Смірнова [10, 43]:

$$d_{II} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{T} - \frac{2i-1}{2n} \right)^2 + \frac{1}{12n} \quad , \quad (78)$$

де d_{II} – показник технічного стану підшипника кочення; n – кількість сигналів акустичної емісії на інтервалі спостереження; t_i – час реєстрації i -го сигналу акустичної емісії, с.

Експериментальні дослідження із застосування зазначених показників проводили на стенді [9 11] (див. рис. 11) при осьовому навантаженні 258 Н. Досліджувався новий підшипник і підшипник з ділянками втомного руйнування кілець (після прискорених ресурсних випробувань). Тривалість інтервалу вимірювання акустичної емісії становила 0,1 с, рівень дискримінації відповідав квантилю розподілу миттєвого значення обвідної акустичної емісії порядку 90%. Інтегральні функції гіпотетичного рівномірного та емпіричних законів розподілу сигналів акустичної емісії в часі наведені на рис. 15 [11]. Показник технічного стану (78) становив 1,15 для нового підшипника та 3,48 для підшипника з ділянками втомного руйнування поверхонь кілець.

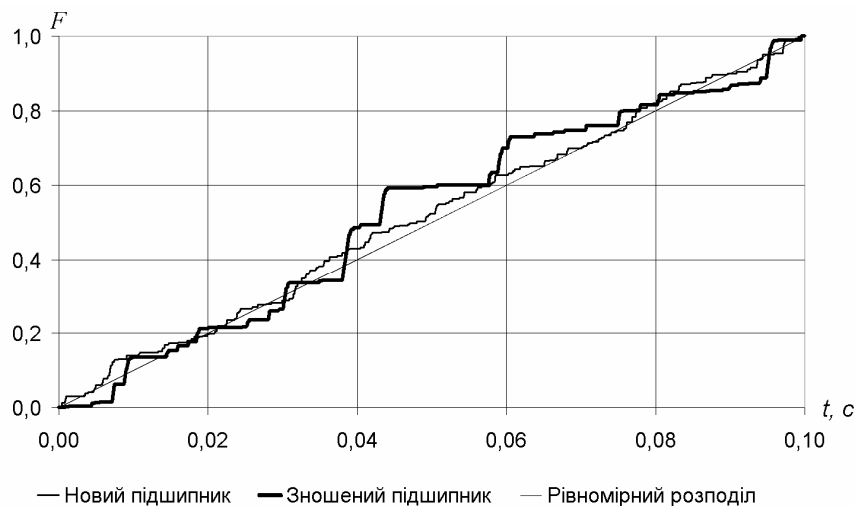


Рисунок 15 – Інтегральні функції гіпотетичного рівномірного та емпіричних законів розподілу сигналів акустичної емісії в часі

Визначення діагностичних параметрів стану підшипників у цьому досліді на основі відмінностей розподілу сигналів акустичної емісії від гіпотетичного розподілу за критерієм згоди Крамера-Мізеса-Смірнова [10, 44] призвело до наступних результатів: показник технічного стану дорівнював 0,015 для нового підшипника та 0,119 для підшипника з ділянками втомного руйнування поверхні кілець. Наведені результати підтверджують можливість використання показників стану, які ґрунтуються на визначенні нерівномірності розподілу сигналів акустичної емісії в часі, для діагностування підшипників кочення.

Теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що при діагностуванні підшипників кочення за тривалістю сигналів акустичної емісії і пауз між ними в якості їх числових характеристик доцільно використовувати безрозмірні комплекси, що враховують дробові моменти зазначених тривалостей та період контактування дефектної ділянки доріжки кочення з тілами кочення [17, 24]:

$$D_{\tau} = \frac{\mathbf{M}[\tau^{V_{AE}}]}{(p_{\kappa} T_Z)^{V_{AE}}}, \quad D_{\vartheta} = \frac{\mathbf{M}[\vartheta^{W_{AE}}]}{((1-p_{\kappa})T_Z)^{W_{AE}}}, \quad (79, 80)$$

$$D_{II} = k_{AE} D_{\tau} D_{\vartheta}, \quad (81)$$

$$k_{AE} = 10^{1,5(W_{AE} + V_{AE})}, \quad (82)$$

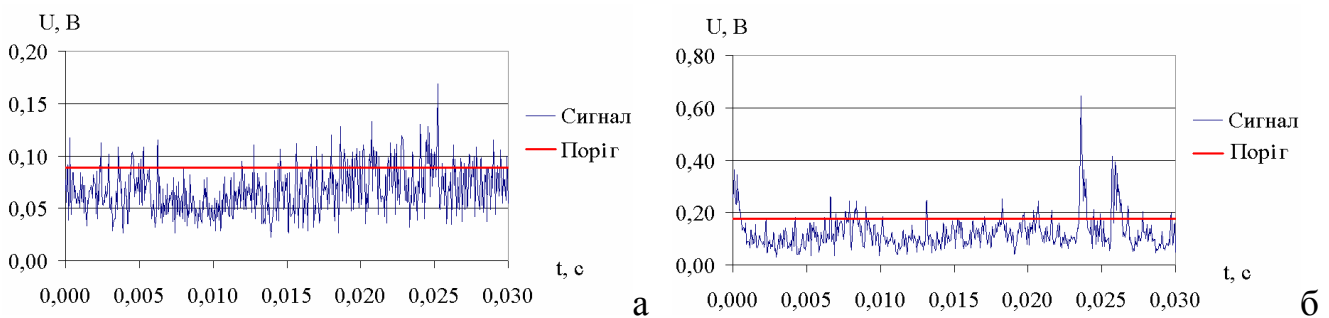
де D_{II} – частковий показник технічного стану підшипника, визначений за тривалостями сигналів АЕ; τ – тривалість сигналу емісії, с; V_{AE} – порядок початкового моменту розподілу тривалостей сигналів акустичної емісії; p_{κ} – порядок квантиля, відповідний рівню дискримінації обвідної емісії; T_Z – період контактування дефектної ділянки доріжки кочення з тілами кочення, с; D_{ϑ} – частковий показник технічного стану підшипника, визначений за тривалостями сигналів АЕ; ϑ – тривалість пауз між сигналами АЕ, с; W_{AE} – порядок початкового моменту розподілу тривалостей пауз між сигналами акустичної емісії; D_{II} – діагностична ознака стану підшипника кочення; k_{AE} – масштабний коефіцієнт.

Оптимізація параметрів, що входять до ознак (79, 80), здійснена методом планування трифакторного експерименту [24]. Випробували два упорних підшипника 8100. На доріжці кочення одного з них за допомогою лазера були створені три виїмки діаметром 1,5 мм і глибиною 0,15 мм, рівномірно розподілені по доріжці кочення. За результатами експерименту (див. рис. 16–18) отримали функцію регресії – залежність імовірності помилки діагностування від варійованих параметрів алгоритму (наведені тільки значимі, відповідно до критерію Стьюдента, складові, для яких критеріальна статистика перевищує критичне значення, що відповідає рівню значимості $\alpha = 0,05$) – див. рис. 19 [24]:

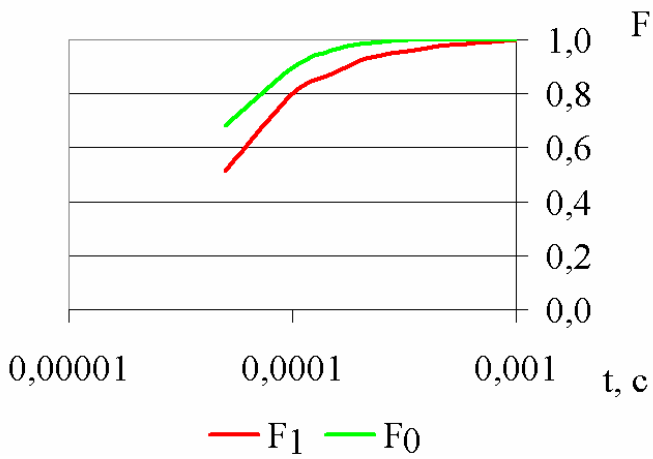
$$P_E = 3,804 p_{\kappa}^2 + 0,00896 V_{AE}^2 + 0,02230 W_{AE}^2 + 2,8039 - 0,15489 p_{\kappa} W_{AE} - 6,2925 p_{\kappa} - 0,09224 V_{AE}, \quad (83)$$

де P_E – ймовірність помилки діагностування.

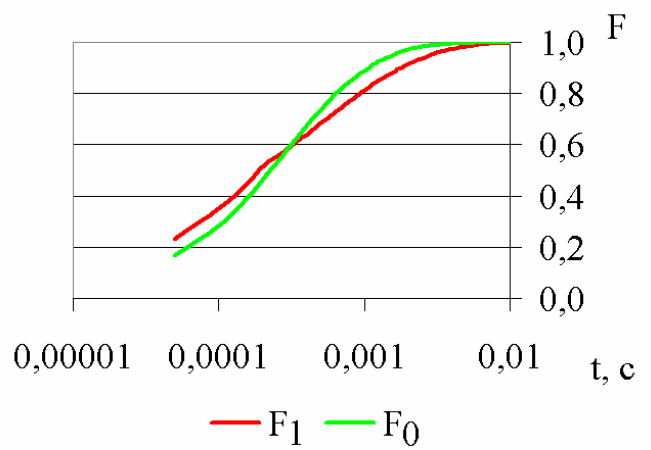
Перевірка за критерієм Фішера показала, що коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,936$, а критеріальна статистика $F = 27,7$ перевищує критичне значення $F_{кр} = 2,5$ (для рівня значимості $\alpha = 0,05$), що свідчить про адекватність функції регресії. Поверхня відгуку, отримана при середньому значенні порядку початкового моменту розподілу тривалостей пауз між сплесками, наведена на рис. 19 [24].



а – бездефектний підшипник, б – дефектний підшипник
Рисунок 16 – Часові діаграми обвідної акустичної емісії:



— F₁ — F₀
 F₀ – бездефектний підшипник,
 F₁ – дефектний підшипник
 Рисунок 17 – Закон розподілу
 тривалостей сигналів емісії



— F₁ — F₀
 F₀ – бездефектний підшипник,
 F₁ – дефектний підшипник
 Рисунок 18 – Закон розподілу
 тривалостей пауз між сигналами емісії

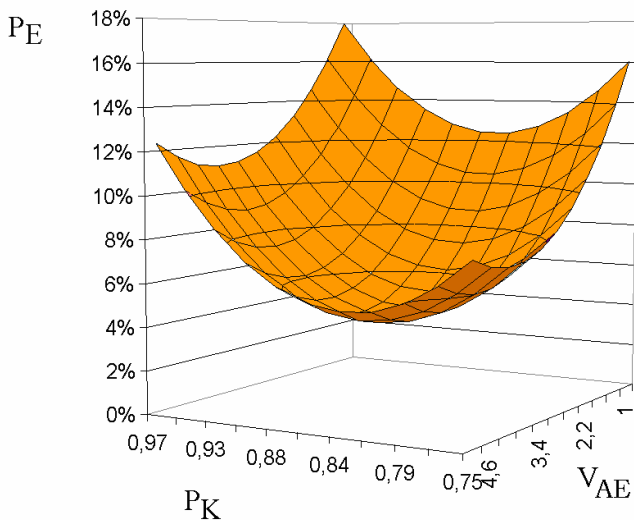
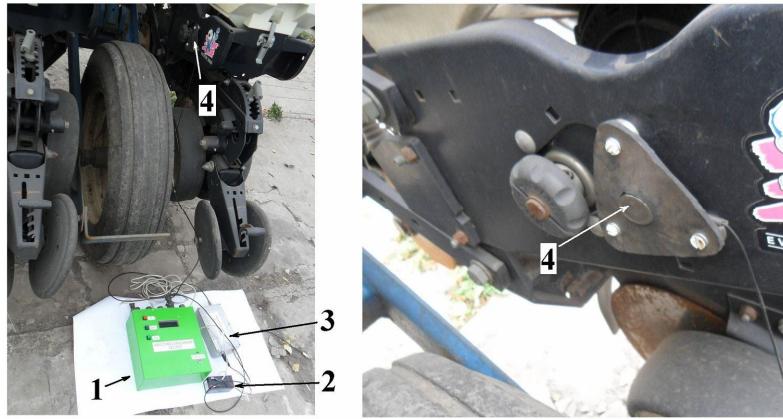


Рисунок 19 – Апроксимація залежності ймовірності помилки діагностування від порядку квантиля і порядку моменту тривалості сигналів АЕ

Оптимальні значення параметрів алгоритму визначені з умови мінімуму функції регресії (83): $P_K = 0,836$, $V_{AE} = 3,98$, $W_{AE} = 1,14$ (при цьому ймовірність помилки діагностування, обчислена за формулою (83), становить 4,4%) [24]. Звернемо увагу на те, що тривалість виміру емісії при цьому становила 0,2 с. Значно зменшити ймовірність помилок діагностування можна, здійснюючи кілька вимірювань і реалізуючи алгоритм виявлення з фіксованим розміром вибірки або послідовне виявлення.

Методика діагностування підшипників кочення за розподілом обвідної акустичної емісії [20, 45] реалізована в акустико-емісійному тестері. Тестер складається з мікропроцесорного електронного блоку, датчика акустичної емісії та підсилювача (див. рис. 20). В електронному блоці розташовані перетворювач живлення, процесорний модуль, рідкокристалічний індикатор та функціональна клавіатура. Процесорний модуль, обґрунтування структури якого наведено в [49], виконано на основі мікропроцесора ATmega32A-PU.

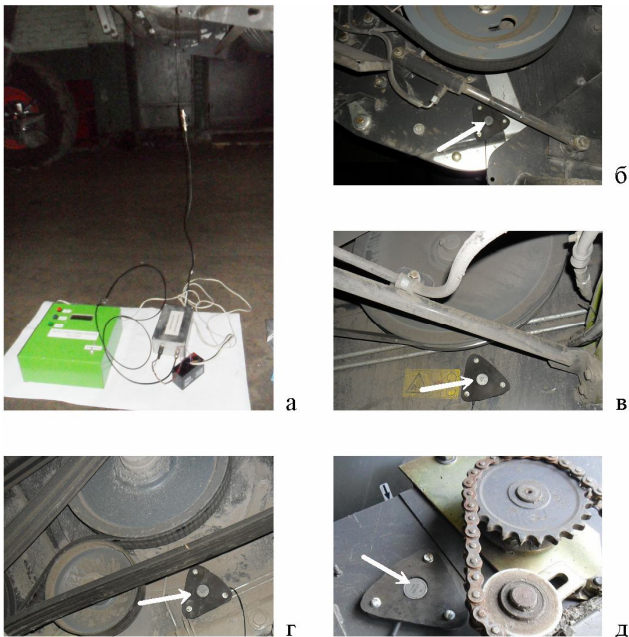
За допомогою акустико-емісійного тестера здійснено діагностування підшипникових вузлів сівалки та зернозбиральних комбайнів у господарствах Харківської області по завершенню сезону польових робіт. Під час діагностування сівалки Kinze 3600 за методикою [20, 45] контролювали підшипникові вузли приводів висівних апаратів – див. рис. 20.



1 – електронний блок акустико-емісійного тестера; 2 – акумулятор;
3 – підсилювач; 4 – датчик акустичної емісії

Рисунок 20 – Діагностування підшипникових вузлів приводів висівних апаратів сівалки Kinze 3600

Під час діагностування комбайнів LEXION 670 і СК- 5М-1 за методикою [20, 45] контролювали стан підшипникових вузлів робочих органів – див. рис. 21 і рис. 22.



а, б – діагностування приводу подрібнювача соломи, в – діагностування приводу соломотряса, г – діагностування приводу молотильного барабану, д – діагностування приводу вивантаження зернового бункера

Рисунок 21 – Діагностування підшипникових вузлів приводів комбайнів LEXION 670 (стрілками позначено датчик акустичної емісії)



а, б – діагностування приводу зернового шнека, в – діагностування приводу переднього контрприводного вала, г – діагностування приводу елеватора, д – діагностування приводу молотильного барабану, е – діагностування вентилятора

Рисунок 22 – Діагностування підшипникових вузлів приводів комбайнів СК- 5М-1 (стрілками позначено датчик акустичної емісії)

За результатами діагностування надані рекомендації щодо заміни та придбання окремих підшипників для зменшення тривалості відновлення при можливій відмові. Розрахунковий річний економічний ефект від технічного обслуговування агрегатів зернозбирального комбайна за станом становить 49 тис. грн. (у цінах 2017 р.). При цьому еквівалентний коефіцієнт готовності збільшується з 90% до 94%.

Результати досліджень впроваджено в ДП «Дослідне господарство «Кутузівка» Інституту сільського господарства Північного Сходу НААН України», фермерському господарстві «Альфа» та в навчальний процес ХНТУСГ для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової проблеми підвищення ефективності машиновикористання в рослинництві, концепція якого полягає в імовірнісному аналізі впливу відмов на КРБП рослин та еквівалентний коефіцієнт готовності як показник ефективності, оцінці відповідності системи технічного обслуговування комплексу машин для рослинництва виробничим вимогам, оптимізації технічного обслуговування агрегатів машин за станом із застосуванням методів, які не потребують попереднього визначення тренда діагностичного параметра.

На основі виконаного дослідження зроблено наступні основні висновки.

1. Проведеним аналізом відомих досліджень встановлено наступне. Відомі аналітичні методи обчислення коефіцієнта готовності як показника ефективності використання машин не враховують такі особливості рослинництва: залежність КРБП рослин від моменту виникнення відмови, нестационарність потоку відмов при обслуговуванні машин за станом, відновлення машин у паузах у виконанні операцій, сезонний характер робіт, використання різноманітних машин у технологічному процесі. Відомі методи оптимізації порогу превентивної заміни при технічному обслуговуванні агрегатів машин для рослинництва за станом потребують даних про тренд діагностичного параметра, що ускладнює їх використання при наявності інкубаційного етапу розвитку дефекту.

2. Методом математичного моделювання процесів виникнення відмов і відновлень машин обґрунтовано залежність для визначення коефіцієнта готовності, яка, на відміну від відомих, ураховує частку середньої тривалості відновлення, що припадає на робочу зміну, формула (1). Зазначена частка виражається через тривалість виробничого циклу, частку робочої зміни в цьому циклі та закон розподілу тривалості відновлення (3), що дає змогу аналітично досліджувати вплив відновлення машини в планових паузах на коефіцієнт готовності. При цьому встановлено, що частка середньої тривалості відновлення машини, яка припадає на робочі зміни, наближено дорівнює частці зміни в робочому циклі, якщо середня тривалість відновлення перевищує 50% тривалості циклу (при експоненціальному розподілі тривалості відновлення).

3. Теоретичним дослідженням доведено, що миттєвий коефіцієнт готовності машини, на відміну від відомих визначень, обчислюється через похідну апроксимації залежності накопиченої тривалості відновлень по напрацюванню (6). Це дає

зможу обчислювати миттєвий коефіцієнт готовності за результатами спостереження за одиничними зразками машин і прогнозувати середній коефіцієнт готовності на наступний сезон робіт (13, 15, 18).

4. Визначення еквівалентної тривалості відновлення, що дорівнює збільшенню тривалості операції при безвідмовній роботі, яке призводить до такого самого зменшення КРБП рослин, що й відмова, дає змогу характеризувати ефективність використання машин для рослинництва еквівалентним коефіцієнтом готовності. Цей показник, на відміну від відомих комплексних показників надійності, враховує тривалість відновлень машини протягом технологічної операції і зменшення КРБП рослин внаслідок відмов. Це дає змогу використовувати еквівалентний коефіцієнт готовності в умовах нестаціонарного потоку відмов (зокрема – при технічному обслуговуванні машин за станом).

Установлено, що еквівалента тривалість відновлення перевищує тривалість відновлення в 1,5 і 2 рази (відповідно, при квадратичній і лінійній залежності КРБП рослин від часу), якщо відмова виникла на початку виконання технологічної операції.

5. Для лінійної, квадратичної та степеневі залежностей КРБП рослин від часу методом математичного моделювання технологічних операцій в умовах відмов машин одержано залежності для визначення впливу відмов на КРБП рослин (22, 27, 30). Ці залежності, на відміну від відомих, ураховують частку площі поля, оброблену до настання відмови, що дає змогу визначити числові характеристики зменшення КРБП рослин при стаціонарному та нестаціонарному потоках відмов. Установлено, що коефіцієнт варіації зменшення КРБП рослин є пропорційним коефіцієнтам варіації тривалості відновлення та частки площі поля, яка лишилась необробленою при виникненні відмови, та перевищує кожен із цих коефіцієнтів. При спадаючій лінійній залежності КРБП рослин від часу зазначений коефіцієнт є на 5% більшим, ніж при спадаючій квадратичній.

6. На основі аналізу стохастичних процесів відмов машин та їх впливу на КРБП рослин обґрунтовано критерій (39) відповідності системи технічного обслуговування комплексу машин для рослинництва виробничому завданню. Цей критерій, на відміну від відомих, ураховує ймовірність зменшення КРБП рослин внаслідок відмов нижче граничного рівня. Використання зазначеного критерію дає змогу керувати ризиками, обумовленими відмовами машин.

7. Математичним моделюванням впливу нестаціонарного потоку відмов машини на виконання технологічної операції рослинництва встановлено вплив обслуговування машини перед зазначеною операцією на КРБП рослин (42, 43). Ці залежності, на відміну від відомих, ураховують початкове значення параметра нестаціонарного потоку відмов та його зміну з напрацюванням (при використанні кусково-лінійної апроксимації зазначеної зміни). Це дає змогу визначити відповідний еквівалентний коефіцієнт готовності машини. Установлено, що внаслідок обслуговування машини за станом збільшується коефіцієнт варіації КРБП рослин.

8. Імовірнісним моделюванням процесів розвитку дефектів і обслуговування агрегатів за станом одержано залежність для визначення зміни параметра потоку відмов із напрацюванням після обслуговування (48). Ця залежність, на відміну від відомих, ураховує пороги превентивної та коригувальної заміни і параметри

розподілу швидкості розвитку дефекту та не потребує інформації щодо початкового значення чи тренда діагностичного параметра. Це дає змогу застосовувати зазначену залежність при наявності інкубаційного етапу розвитку дефекту. На цій основі одержано залежності для визначення впливу управляючого параметра обслуговування за станом на КРБП рослин (56), що дає змогу визначати вплив обслуговування за станом на еквівалентний коефіцієнт готовності.

9. Установлено, що при відносній вартості агрегату (співвідношення вартості з урахуванням превентивної заміни та зменшення врожаю внаслідок відмови) у діапазоні 0,5–2 і співвідношенні витрат на заміну агрегату при коригувальному обслуговуванні та превентивній заміні в діапазоні 1–5, співвідношення витрат при обслуговуванні за технічним станом і коригувальному обслуговуванні знаходиться в діапазоні 0,4–0,8 (при коефіцієнті варіації швидкості збільшення розміру дефекту 0,5).

10. За результати теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовано діагностичні ознаки трибосистем кочення, які, на відміну від відомих, ґрунтуються на порівнянні фактичного розподілу обвідної акустичної емісії в часі або за амплітудою з теоретичними розподілами, відповідними бездефектному стану трибосистем. Це дає змогу використовувати зазначені ознаки в умовах масштабування сигналу емісії по амплітуді.

11. Розрахунковий річний економічний ефект від технічного обслуговування агрегатів зернозбирального комбайна за станом становить 49 тис. грн, при цьому еквівалентний коефіцієнт готовності збільшується з 90% до 94%. Результати досліджень впроваджено в ДП «Дослідне господарство «Кутузівка» Інституту сільського господарства Північного Сходу НААН України», фермерському господарстві «Альфа» та в навчальний процес ХНТУСГ для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Войтов В. А., Митиков С. А., Суханов М. И, Шевченко С.А. Методика оценок показателя противопиттинговой способности смазочных материалов. *Проблеми трибології*. 2006. № 1. С. 39–43.

2. Шевченко С. А. Вплив показників надійності сільськогосподарських машин на ефективність виконання технологічної операції. *Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2009. Вип. 77. С. 403–407.

3. Шевченко С. А., Клімов П. М. Дослідження впливу якості діагностування на надійність сільськогосподарських машин та тривалість виконання технологічних операцій. *Проблеми надійності машин і засобів механізації сільськогосподарського виробництва. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2009. Вип. 80. С. 235–239.

4. Войтов В. А., Шевченко С. А. Дослідження впливу початкового стану машинних сільськогосподарських агрегатів на тривалість технологічної операції та втрати врожаю. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. Спеціальний випуск "Сучасні проблеми землеробської механіки"*. 2009. № 2. С. 133–135.

5. Шевченко С. А. Оцінка ефективності використання часу при виконанні технологічних операцій рослинництва. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2009. Вип. 13 (27). Книга 2. С. 84–88.

6. Шевченко С. А. Дослідження впливу відмови техніки на коефіцієнт реалізації біологічного потенціалу рослин. *Проблеми технічної експлуатації машин. Системотехніка і технології лісового комплексу. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2010. Вип. 94. С. 22–25.

7. Шевченко С. А. Анализ влияния надежности машин технологического комплекса на вероятность выполнения производственного задания. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого*. 2010. №4. С. 30–36.

8. Шевченко С. А. Оцінювання власної частоти контакту пар тертя кочення шарикопідшипника. *Сільськогосподарські машини: збірник наукових статей*. Луцьк : ЛНТУ, 2010. Вип. 20. С. 386–391.

9. Войтов В. А., Шевченко С. А. Обоснование структуры комплекса для исследования акустико-эмиссионных признаков дефектов подшипников качения. *Проблеми технічної експлуатації машин. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2011. Вип. 109. С. 50–54.

10. Шевченко С. А. Класифікація та обґрунтування вимог до акустико-емісійних ознак дефектів пар тертя механізмів. *Технічний сервіс машин для рослинництва. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2012. Вип. 121. С. 159–163.

11. Шевченко С. А. Діагностування підшипника кочення за розподілом імпульсів акустичної емісії у часі. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава : Полтавський національний технічний університет імені Ю. Кондратюка, 2012. Вип. 2(32). Т. 2. С. 93–98.

12. Шевченко С. А. Определение показателей ремонтпригодности машины по показателям надежности и ремонтпригодности агрегатов. *Проблеми надійності машин і засобів механізації сільськогосподарського виробництва. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2013. Вип. 139. С. 58–62.

13. Шевченко С. А. Моделирование лесоводства и растениеводства при использовании машин повышенной надежности. *Сільськогосподарські машини: збірник наукових статей*. Луцьк : ЛНТУ, 2013. Вип. 25. С. 176–181.

14. Шевченко С. А. Диагностирование трибосистемы скольжения по интервалу корреляции огибающей сигналов акустической эмиссии. *Інноваційні технології деревооброблюваної промисловості та механізації процесів у лісовому*

комплексі. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2013. Вип. 143. С. 160–165.

15. Шевченко С. Исследование влияния длительности восстановления машины на потери продукции растениеводства. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation in farm and agri-food industry machinery*. Lublin–Rzeszów: Polish Academy of Sciences, University of Engineering and Economic in Rzeszów. 2013. Vol. 15. Iss. 7. P. 40–44.

16. Шевченко С. А. Підвищення надійності машин методом превентивної заміни елементів при наявності інкубаційного періоду розвитку дефектів. *Технічний сервіс машин для рослинництва. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 145. С. 198–202.

17. Шевченко С. А. Диагностирование подшипника качения по длительностям импульсов и пауз огибающей акустической эмиссии. *Деревообробувальні технології та системотехніка лісового комплексу. Транспортні технології. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 147. С. 97–102.

18. Шевченко С. Исследование влияния отказа сельхозмашины на урожайность при нелинейной зависимости потерь от времени. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation in farm and agri-food industry machinery*. Lublin–Rzeszów: Polish Academy of Sciences, University of Engineering and Economic in Rzeszów. 2014. Vol. 16. Iss. 7. P. 157–166.

19. Шевченко С. А. Оптимизация периодичности диагностирования агрегатов машин при наличии инкубационного этапа развития дефекта. *Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 151. С. 21–25.

20. Шевченко С. А. Контроль режима смазки подшипника качения по распределению огибающей акустической эмиссии. *Інноваційні технології деревообробної промисловості та механізації процесів у лісовому комплексі. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 155. С. 67–71.

21. Шевченко С. А. Прогнозирование коэффициента готовности машин растениеводства. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2015. №3. С. 94–102.

22. Шевченко С. Потери урожая при корректирующем ремонте машины и при обслуживании по состоянию перед технологической операцией. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation in farm and agri-food industry machinery*. Lublin–Rzeszów: Polish Academy of Sciences, University of Engineering and Economic in Rzeszów. 2015. Vol. 17. Iss. 7. P. 149–157.

23. Шевченко С. А. Правило замены агрегата по техническому состоянию с учетом инкубационного этапа развития дефекта. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. №4. С. 190–201.

24. Шевченко С. Оптимизация параметров алгоритма акустико-эмиссионного диагностирования подшипника качения. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation in farm and agri-food industry machinery*. Lublin–Rzeszów: Polish Academy of Sciences, University of Engineering and Economic in Rzeszów. 2016. Vol. 18. Iss. 7. P. 19–26.

25. Шевченко С. А. Особливості визначення коефіцієнта готовності машин рослинництва при нестационарному потоці відмов. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2016. Вип. 167. С. 99–103.

26. Шевченко С. Определение коэффициента готовности машины при периодической работе и двухэтапном процессе восстановления после отказа. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation in farm and agri-food industry machinery*. Lublin–Rzeszów: Polish Academy of Sciences, University of Engineering and Economic in Rzeszów. 2016. Vol. 18. Iss. 5. P. 59–66.

27. Шевченко С. А. Определение коэффициента готовности при использовании плановых пауз в работе для восстановления машины. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. №5. С. 210–221.

28. Шевченко С.А. Моделирование потерь урожая внаслідок відмови машин при пропорційності потерь отклонению от оптимального агротермина. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2017. Вип. 262. С. 255–265.

29. Шевченко С. А. Визначення середнього недовикористаного ресурсу агрегатів при обслуговуванні за станом при наявності інкубаційного етапу розвитку дефекту. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. №7. С. 120–126.

30. Шевченко С.А. Дослідження залежності накопиченої тривалості відновлень машин рослинництва від напрацювання. *Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу*. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2017. Вип. 189. Том 2. С. 43–53.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

31. Войтов В. А., Шевченко С. А., Ярошно С. Ю. Оценка производительности сельскохозяйственной техники с учетом эксплуатационных факторов. *Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса. Доклады Международной научно-практической конференции*. Минск: Белорусский аграрный технический университет, 2009. Часть 1. С. 236–241.

32. Шевченко С.А. Повышение эффективности использования сельскохозяйственных машин путем диагностирования. *Материалы конференции*

«Проблемы сельскохозяйственного производства на современном этапе и пути их решения». XIII международная научно-производственная конференция (19–22 мая 2009 г.). Белгород: Изд-во Белгородской ГСХА, 2009. С. 235.

33. Шевченко С. А. Дослідження впливу відмов машин технологічного комплексу на якість виконання технологічної операції. *Матеріали Міжнародного науково-практичного форуму «Наукові і практичні аспекти агропромислового виробництва та розвитку сільських регіонів» (22 – 24 вересня 2010 р.)*. Львів: ЛНАУ. 2010. С. 436–439.

34. Шевченко С. А. Ресурсосберегающая методика эксплуатации машин по техническому состоянию. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. *Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции «Эколого-ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве»*. ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия». Воронеж, 2014. № 3. Ч. 4 (8–2). С. 468–472.

35. Шевченко С. А. Применение статистических критериев при акустико-эмиссионном диагностировании подшипников качения. *Сборник тезисов Международной научно-практической конференции «Новейшие технологии развития конструкции, производства, эксплуатации, ремонта и экспертизы автомобиля» 15–16 октября 2014 г.* Харьков: ХНАДУ. 2014. С. 178–179.

36. Шевченко С. А. Особенности осуществления превентивной замены элементов машин при наличии инкубационного этапа развития дефекта. *Наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології в автомобілебудівництві та транспорті» 15–16 жовтня 2015 р.* Харків: ХНАДУ. С. 195–196.

37. Шевченко С. А. Прогнозування коефіцієнта готовності машин рослинництва. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (5–6 листопада 2015 р.)*. Кіровоград: Кіровоградський національний технічний університет. С. 79–80.

38. Шевченко С. А. Определение коэффициента готовности машин с учетом плановых пауз в работе. *Наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців» (20–21 жовтня 2016 р.)*. Харків: ХНАДУ. С. 129–130.

39. Шевченко С. А. Методика визначення втрат врожаю внаслідок відмови машини за кусково-лінійної апроксимації втрат від часу виконання технологічної операції. *Збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» 16-17 лют. 2017 р., м. Київ*. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2017. С. 104–106.

40. Шевченко С. А. Моделирование двухэтапного процесса восстановления машины с учетом плановых пауз в работе. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017)* : матеріали тез доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 24–27 квіт. 2017 р.). Чернігів : Чернігівський національний технологічний університет, 2017. Т. 2. С. 123–125.

41. Шевченко С. А. Прогнозування коефіцієнта готовності самохідних машин. *Тези доповідей IV Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми конструювання, експлуатації та ремонту обладнання лісового комплексу» (16-17 листопада 2017 року)*. Луцьк: інф.-вид. відділ ЛНТУ, 2017. С. 186–188.

42. Шевченко С. А. Зміна потоку відмов агрегатів у часі при обслуговуванні за станом. *Наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців» (19-20 жовтня 2017 р.)*. Харків: ХНАДУ. С. 150–151.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

43. Спосіб акустико-емісійного діагностування підшипника кочення : патент на корисну модель 75046 Україна, МПК G 01 N 29/14 / Шевченко С. А. u201202937; заявл. 13.03.2012; опубл. 26.11.2012. Бюл. №22.

44. Спосіб акустико-емісійного діагностування підшипника кочення : патент на корисну модель 75048 Україна, МПК G 01 N 29/14. / Шевченко С. А. u201202946; заявл. 13.03.2012; опубл. 26.11.2012. Бюл. №22.

45. Спосіб акустико-емісійного моніторингу режиму змащення підшипника кочення : патент на корисну модель 96750 Україна, МПК F16C 19/52, G01N 29/14 / Шевченко С. А. u201410518; заявл. 25.09.2014; опубл. 10.02.2015. Бюл. №3.

46. Шевченко С. А., Кириченко С. С. Сравнительный анализ методов диагностирования агрегатов машин. *Лес. Наука. Молодежь – 2009*. Воронеж: ГОУ ВПО "ВГЛТА", 2009. Т. 1. С. 205–208.

47. Шевченко С. А. Анализ влияния качества диагностирования на надежность и производительность машин. *Межвузовский сборник научных трудов. Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте*. Воронеж: ГОУ ВПО "ВГЛТА", 2009. Вып. 4. С. 155–160.

48. Войтов В. А., Шевченко С. А. Исследовательский комплекс для изучения акустико-эмиссионных признаков дефектов подшипников качения. *Межвузовский сборник научных трудов. Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте*. Воронеж: ГОУ ВПО "ВГЛТА", 2010. Вып. 5. С. 288–291.

49. Овсянников С. И., Шевченко С. А., Огильба В. Ф. Обоснование структуры измерительного комплекса для проведения тяговых испытаний мотоагрегатов. *Електронне наукове видання «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології»*. 2012. №3. [Електронний ресурс]. Режим доступу http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE12_1c/index.html

50. Шевченко С. А. Исследование влияния отказа машины на вероятность выполнения технологической операции в оптимальные сроки и потери урожая. *Вісник Центру наукового забезпечення АПВ Харківської області*. 2015. Вип. 19. С. 178–184.

АНОТАЦІЯ

Шевченко С.А. Концепція підвищення ефективності машиновикористання в рослинництві технічним обслуговуванням за станом – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Харків, 2018.

Наведено нове вирішення проблеми підвищення ефективності машиновикористання, концепція якого полягає в імовірнісному аналізі впливу відмов на коефіцієнт реалізації біопотенціалу рослин та еквівалентний коефіцієнт готовності як показник ефективності, оцінці відповідності технічного обслуговування машин виробничим вимогам, оптимізації обслуговування агрегатів машин за станом із застосуванням методів, які не потребують попереднього визначення тренда діагностичного параметра. Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні взаємозв'язку між ефективністю використання машин, інтенсивністю виникнення дефектів, залежністю врожайності від часу, інтенсивністю розвитку дефекту, його акустико-емісійною діагностичною ознакою та порогом превентивної заміни.

Ключові слова: рослинництво, машина, відмова, врожай, технічне обслуговування за станом, оптимізація, діагностування, акустична емісія.

ABSTRACT

Shevchenko S. A. Concept of improving the efficiency of machine use in crop production through condition-based maintenance – Qualifying scientific work on the manuscript.

Thesis for the degree of doctor of technical science on specialty 05.05.11 – machines and means of mechanization of an agricultural production. Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, 2018.

A new solution of the scientific problem of increasing machine use efficiency is presented, the concept of which is a probabilistic analysis of the failure impact on the plant coefficient of biopotential realization and an equivalent availability ratio as a productivity indicator, an assessment of the compliance of the machine maintenance with the requirements, an optimization of the condition-based maintenance of the machine units using methods that do not require prior determination of the diagnostic parameter trend.

The scientific novelty of the study is to establish the relationship between the efficiency of using machines for the crop production, the defect appearance intensity, the dependence of the yield on the time, the defect development intensity, its acoustic-emissive diagnostic property, and the preventive replacement threshold for the condition-based maintenance.

Key words: plant cultivation, agricultural machinery, failure, harvest, condition based maintenance, optimization, diagnosis, acoustic emission.

АННОТАЦИЯ

Шевченко С. А. Концепция повышения эффективности машиноиспользования в растениеводстве техническим обслуживанием по состоянию – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, Харьков, 2018.

В диссертации приведены теоретическое обобщение и новое решение научной проблемы повышения эффективности использования машин в растениеводстве, концепция которого заключается в вероятностном анализе влияния отказов на коэффициент реализации биопотенциала (КРБП) растений и эквивалентный коэффициент готовности как показатель эффективности, оценке соответствия системы технического обслуживания комплекса машин для растениеводства производственным требованиям, оптимизации технического обслуживания агрегатов машин по состоянию с применением методов, которые не требуют предварительного определения тренда диагностического параметра.

Научная новизна полученных результатов состоит в установлении взаимосвязи между показателями эффективности использования машин для растениеводства, интенсивностью возникновения дефектов, зависимостью КРБП растений от времени, числовыми характеристиками интенсивности развития дефекта, его акустико-эмиссионным диагностическим признаком и порогом превентивной замены при техническом обслуживании агрегата машины по состоянию.

Методом математического моделирования процессов возникновения отказов и восстановлений машины обоснована зависимость для определения коэффициента готовности, которая, в отличие от известных, учитывает часть средней длительности восстановления, которая приходится на рабочую смену. Указанная часть выражается через длительность производственного цикла, часть рабочей смены в этом цикле и закон распределения длительности восстановления.

Теоретическим исследованием доказано, что мгновенный коэффициент готовности машины, в отличие от известных определений, вычисляется через производную аппроксимации зависимости накопленной продолжительности восстановлений по наработке. Это позволяет вычислять мгновенный коэффициент готовности по результатам наблюдений за единичными образцами машин. Усовершенствованы зависимости для определения и прогнозирования мгновенного и среднего значений коэффициента готовности машин для растениеводства, которые основываются на определении динамики увеличения накопленной продолжительности восстановлений с наработкой.

Определение эквивалентной длительности восстановления, которая равна увеличению продолжительности операции при безотказной работе, которое приводит к такому же уменьшению КРБП растений, что и отказ, позволяет характеризовать эффективность использования машин для растениеводства эквивалентным коэффициентом готовности.

Для линейной, квадратичной и степенной зависимостей КРБП растений от времени методом математического моделирования технологических операций в условиях отказов машин получили дальнейшее развитие зависимости для определения влияния отказов на числовые характеристики КРБП растений.

На основе анализа стохастических процессов отказов машин и их влияния на КРБП растения обоснован критерий соответствия системы технического обслуживания комплекса машин для растениеводства производственной задаче. Этот критерий учитывает вероятность уменьшения КРБП растений вследствие отказов ниже предельного уровня. Использование указанного критерия позволяет управлять рисками, обусловленными отказами машин.

Вероятностным моделированием процессов развития дефектов и обслуживания агрегатов по состоянию впервые получена зависимость для определения изменения параметра потока отказов с наработкой после обслуживания. Эта зависимость, в отличие от известных, учитывает порог превентивной замены, порог корректирующей замены, параметры распределения скорости развития дефекта и не нуждается в информации о начальном значении или тренде диагностического параметра. Это позволяет применять указанную зависимость при наличии инкубационного этапа развития дефекта.

Численным моделированием получена графоаналитическая зависимость оптимального значения управляющего параметра обслуживания по состоянию от относительной стоимости агрегата и соотношения затрат при корректирующем обслуживании и превентивной замене агрегата. Установлено, что при относительной стоимости агрегата (соотношение стоимости с учетом превентивной замены и уменьшения урожая вследствие отказа) в диапазоне 0,5-2 и соотношении затрат на замену агрегата при корректирующем обслуживании и превентивной замене в диапазоне 1-5, соотношение затрат при обслуживании по техническому состоянию и корректирующем обслуживании находится в диапазоне 0,4-0,8 (при коэффициенте вариации скорости увеличения размера дефекта 0,5).

По результатам теоретических и экспериментальных исследований получили дальнейшее развитие диагностические признаки трибосистем качения, которые, в отличие от известных, основываются на сравнении фактического распределения огибающей акустической эмиссии во времени или по амплитуде с теоретическими распределениями, соответствующими бездефектному состоянию трибосистем. Это позволяет использовать указанные признаков в условиях масштабирования сигнала эмиссии по амплитуде.

Ключевые слова: растениеводство, машина, отказ, урожай, техническое обслуживание по состоянию, оптимизация, диагностирование, акустическая эмиссия.