

Механізація, електрифікація

УДК 631.53.04

©2021

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕПРЯМОЛІНІЙНОСТІ РЯДКІВ ПРОСАПНИХ КУЛЬТУР ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НОВОГО ПОКАЗНИКА

*В.В. Адамчук¹, В.М. Булгаков², В.Т. Надикто³,
В.М. Кюрчев⁴, Є.І. Ігнат'єв⁵, М.М. Борис⁶*

^{1,2}доктори технічних наук, професори, академіки НААН

^{3,4}доктори технічних наук, професори, члени-кореспонденти НААН

^{5,6}кандидати технічних наук

*¹Національний науковий центр «Інститут механізації та
електрифікації сільського господарства,*

вул. Вокзальна, 11, смт Глеваха, Фастівського р-ну Київської обл., 08631, Україна

*²Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна*

*^{3,4,5}Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*

просп. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь Запорізької обл., 72312, Україна

⁶Подільський державний аграрно-технічний університет

вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський Хмельницької обл., 32316, Україна

e-mail: ¹vvadamchuk@gmail.com, ²vbulgakov@meta.ua, ³volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua,

⁴office@tsatu.edu.ua, ⁵yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua, ⁶mvapk@pdatu.edu.ua

ORCID: ¹0000-0003-0358-7946, ²0000-0003-3445-3721, ³0000-0002-1770-8297,

⁴0000-0003-4377-1924, ⁵0000-0003-0315-1595, ⁶0000-0003-0677-9505

Надійшла 09.07.2021

Мета. Ефективне і точне оцінювання непрямолінійності траєкторій рядків просапних культур за допомогою розробленого нового агроінженерного методу, заснованого на використанні комплексного дисперсійно-частотного показника. **Методи.** Теоретичні передумови розв'язання цього завдання здійснено з використанням основних положень теорії ймовірності і математичної статистики. **Методику** отримання і аналізу експериментальних даних здійснено з використанням елементів дисперсійного і кореляційного аналізу випадкових коливальних процесів. **Результати.** Теоретичним способом визначено кореляційну функцію процесу відхилення траєкторій рядків просапної культури від прямої лінії і дисперсію цих відхилень D_x . Завдяки аналізу отриманої кореляційної функції визначено інтервал кореляції x_k , який репрезентує частотну складову коливальних досліджуваного гармонічного процесу. У підсумку встановлено, що непрямолінійність рядків просапної

культури можна вважати прийнятною, якщо дисперсія їх коливань D_x не перевищує $12,5 \text{ см}^2$, а інтервал кореляції нормованої кореляційної функції x_k є більшим за 25 м . Практична перевірка нового комплексного дисперсійно-частотного показника показала, що непрямої лінійності сходів соняшнику, посіяного трактором ХТЗ-16131 і сівалкою Leda-12, є прийнятною за дисперсією D_x ($6,44 \text{ см}^2$) і близькою до прийнятної за інтервалом кореляції x_k (20 м). **Висновки.** Непрямої лінійності рядків будь-якої просапної культури може бути оцінена комплексним дисперсійно-частотним показником, який прямо репрезентує енергію і опосередковано — частоту відхилень траєкторій сходів цієї культури від прямої лінії. Першою складовою цього комплексного показника є дисперсія вказаних відхилень, а другою — інтервал кореляції нормованої кореляційної функції коливань досліджуваного процесу.

Ключові слова: просапна культура, рядок, теоретичні дослідження, польові випробування, дисперсія, кореляційна функція, комплексний показник.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovysnyk202108-05>

Для низки просапних сільськогосподарських культур (соняшник, кукурудза, соя тощо) технологія їх вирощування передбачає проведення міжрядного обробітку сходів. У процесі виконання цієї важливої технологічної операції можливе механічне пошкодження культурних рослин робочими органами машин, якими здійснюють догляд за сходами. Імовірність такого небажаного результату тим нижча, чим більша прямої лінійності траєкторії рядків оброблюваної культури.

Якісні показники роботи просапного машинно-тракторного агрегату істотно залежать від прямої лінійності рядків оброблюваної культури. Надмірна викривленість останніх унеможлиблює їх механізований обробіток із заданою якістю [2].

З огляду на це дослідники підкреслюють, що ефективність роботи просапного агрегату має, крім іншого, оцінюватися коефіцієнтом прямої лінійності його руху [4]. Водночас, якою має бути природа цього коефіцієнта, вони не вказують.

Що стосується оцінювання непрямої лінійності сходів просапних культур, то нині існує кілька методик цього процесу. За однією з них науковці пропонують викривленість рядків оцінювати одночасно стандартами коливань їх траєкторії та радіусів кривизни [16, 17].

Слід підкреслити, що практичне застосування другого показника із вказаних двох є надто складним і малоінформативним.

Адже, якщо визначити стандарт коливань радіусу кривизни рядків, то залишається невідомим те значення цього показника, яке можна вважати прийнятним. Максимально зменшувати його величини недостатньо. Адже за наближеного до нульового стандарту коливань радіусу кривизни траєкторії рядків може бути неприйнятною його (радіуса) середнє значення.

Щодо такого показника, як стандарт відхилення траєкторії рядка від прямої лінії, то у порівнянні з розглянутим вище за одних і тих самих недоліків він має лише одну істотну перевагу — простоту визначення.

Згідно з другим методом, викривленість рядків просапних культур передбачається оцінювати за значенням відхилення їх траєкторії на заданій довжині. За агротехнічними вимогами непрямої лінійності сходів можна вважати прийнятною, якщо на довжині 50 м максимальне відхилення траєкторії рядка від його осьової лінії не перевищує 5 см [9, 15].

Незважаючи на простоту визначення, інформативність цього методу є також недостатньою.

У роботі [16] запропоновано показник μ , який більш вдало розкриває внутрішню природу коливального процесу, зв'язуючи між собою розмах C та період h коливань траєкторії рядка просапної культури:

$$\mu = \frac{C}{h}. \quad (1)$$

Для розрахунку величини μ реального рядка рослин слід, як вказує автор [16], візуально виділити ряд окремих синусоїдальних хвиль і провести вимірювання розмаху C та довжини h кожної з них. Після цього, згідно з виразом (1), для кожної ділянки рядка визначаються окремі оцінки непрямої лінійності, а потім, за допомогою відомих співвідношень, їх середнє значення, дисперсія та інші статистичні характеристики.

Попри все, цей метод також не позбавлений істотних недоліків. По-перше, він дуже трудомісткий. По-друге, як і у попередників, невідомо, яке значення показника m є прийнятним, а яке — ні.

Виходячи із вище зазначеного, нами був запропонований дисперсійно-частотний показник оцінювання непрямої лінійності рядків просапних культур [13]. Вихідна вимога при розробленні цього показника залишається тією самою [15]: відхилення траєкторії рядка просапної культури на довжині 50 м не повинне перевищувати 5 см. Водночас приймали, що переважна більшість цих відхилень має форму, яка задовільно описується синусоїдальним законом з амплітудою C і періодом h :

$$y = C \cdot \sin \omega x = C \cdot \frac{\sin 2\pi}{h} x. \quad (2)$$

де x — координата точки траєкторії рядка посівів на його осі.

Прийнявши для цього випадку, $C=0,05$ і $h=100$ м, остаточно маємо:

$$y = 0,05 \cdot \frac{\sin \pi}{50} x. \quad (3)$$

Змінюючи аргумент x виразу (3) від 0 до 200 з кроком 1 м, формували масив із 200 значень функції y . Далі з цього масиву даних за допомогою відомих із математичної статистики співвідношень визначали дисперсію D і частоту зрізу ω_0 спектральної щільності коливань досліджуваного процесу.

У підсумку отримували комплексний дисперсійно-частотний показник для оцінювання непрямої лінійності сходів просапних культур. Згідно цього показника коливання траєкторії рядків вказаних культур є прийнятними, якщо:

$$\begin{aligned} D &\leq 12,50 \text{ см}^2; \\ \omega_0 &\leq 0,25 \text{ м}^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Практика застосування умов (4) вказала на складність визначення частотного

показника ω_0 . Передусім через його значну суб'єктивність. Причому переважно це стосується досліджуваних процесів із низькою дисперсією і відносно широким спектром частот коливань.

З огляду на це потребує розроблення нова простіша і досконаліша методика оцінювання відхилень траєкторій рядків просапної культури від прямої лінії, тобто визначення їх непрямої лінійності.

Мета досліджень. Ефективне і точне оцінювання непрямої лінійності траєкторій рядків просапних культур за допомогою розробленого нового агроінженерного методу, заснованого на використанні комплексного дисперсійно-частотного показника.

Методика досліджень. Суть новизни запропонованого нами методу розв'язання поставленого завдання полягає у відмові від частотної складової комплексного показника (4) у вигляді частоти зрізу ω_0 спектральної щільності коливань досліджуваного процесу. Оскільки частотний склад останнього, крім спектральної щільності, може характеризувати його кореляційна функція. Для цього використовують таку її характеристику, як інтервал кореляції. Зазвичай під ним розуміють час або шлях, протягом якого кореляційний зв'язок між суміжними координатами коливального процесу затухає або зникає остаточно [11]. З огляду на це, для випадкових процесів інтервал кореляції — це відрізок часу/шляху від початку координат до першого перетину кореляційної функції з віссю абсцис. Значно прийнятнішим є низькочастотний процес, у якому час/шлях кореляційного зв'язку більший. Зауважимо, що визначення інтервалу кореляційної функції коливального процесу є значно простішим і точнішим у порівнянні з визначенням параметра ω_0 .

Як зазначалося вище, вираз (2) є тим законом, який задовільно описує процес відхилення траєкторій рядків просапних культур від прямої лінії. Методика подальших теоретичних досліджень полягала у застосуванні цього закону для визначення кореляційної функції R_x і її інтервалу кореляції x_k , а також дисперсії D_x цього процесу.

Отримані при цьому величини параметрів D_x і x_k мають відображати ті межі нового комплексного дисперсійно-частотного

показника, невідповідність яким вказує на неприйнятну непрямолінійність рядків просапних культур.

Результати теоретичних досліджень були перевірені під час польових експериментальних досліджень, під час яких здійснювалося застосування нового показника оцінювання непрямолінійності слідів 12-рядної просапної сівалки Leda-12 (Elvorti, Україна). Цю сівалку агрегатували з універсально-просапним трактором ХТЗ-16131 (Харків, Україна) (рис. 1) на сівбі соняшнику.

Після отримання сходів цієї культури паралельно одному з рядків на відстані 0,5 м прокладали шнур, довжиною 250 м.

Відстань від шнура до траєкторії рядка вимірювали за допомогою метрової лінійки. Кількість замірів — 200, а крок вимірювань $\Delta x = 1$ м.

Значення останнього вибрали із наступних міркувань. Згідно з даними [6] крок вимірювання того чи іншого параметра можна визначити із виразу:

$$\Delta x = 0,5 \cdot V_p \cdot f_0, \quad (5)$$

де V_p — швидкість поступального руху посівного машинно-тракторного агрегату, м/с; f_0 — верхня частота спектру коливань досліджуваного процесу, Гц.

За даними [6] величина параметра f_0 для більшості просапних агрегатів знаходиться на рівні 1 Гц. За технологічно прийнятної швидкості руху 2 м/с машинно-тракторного агрегата на сівбі просапних культур отримуємо:

$$\Delta x = 0,5 \cdot 2 \cdot 1 = 1 \text{ м.}$$

Посівний агрегат на залізковій ділянці довжиною 250 м рухався на одній і тій самій передачі у напрямках «уперед і назад». Цим самим забезпечувалася 2-разовість проведення експериментальних досліджень.

Час t проходження агрегатом залізкової ділянки реєстрували електронним секундоміром Flott F360. Швидкість V_p поступального руху посівного машинно-тракторного агрегата розраховували так:

$$V_p = \frac{250}{t}. \quad (6)$$

Перед проведенням досліджень реєстрували вологість і щільність ґрунту дослідного поля у шарі глибиною 0–15 см. Для визначення вологості ґрунту застосовували загальновідомий термостатно-ваговий метод.

Дані вимірювань відхилення траєкторії рядків соняшнику від прямої лінії використовували для розрахунку дисперсії і нормованої кореляційної функції досліджуваного процесу. Після побудови останньої графічно визначали величину інтервалу кореляції x_k . На завершення експериментально отримані значення D_x і x_k порівнювали з розрахунковими.

Результати досліджень. Кореляційна функція R_x залежності (2) є такою:

$$R_x = \frac{C^2}{2} \cdot \frac{\cos 2\pi x}{h} x. \quad (7)$$

У цьому виразі величина $\frac{C^2}{2}$ — це дисперсія D_x коливань досліджуваного процесу. Оскільки у нашому випадку $C = 0,05$ м, то:

$$D_x = 0,00125 \text{ м}^2 = 12,5 \text{ см}^2.$$



Рис. 1. Посівний машинно-тракторний агрегат в складі колісного агрегуючого трактора ХТЗ-16131 та просапною сівалкою Leda-12

Як бачимо, навіть за такого підходу вирішення поставленого завдання перша складова комплексного показника коливань траєкторії рядків просапних культур у вигляді її дисперсії за своїм значенням у порівнянні із попередньою (4) залишається без зміни.

Щодо нової частотної складової комплексного дисперсійно-частотного показника. Інтервал кореляції коливального процесу можна визначити з умови $R_x = 0$. Аналізуючи вираз (7), бачимо, що це — можливо, коли:

$$\frac{2\pi}{h} x_k = \frac{\pi}{2}, \quad (8)$$

де x_k — інтервал кореляції кореляційної функції досліджуваного процесу.

Звідси випливає, що:

$$\frac{2\pi}{h} x_k = \frac{\pi}{2} \quad \text{або} \quad \frac{2x_k}{h} = \frac{1}{2}. \quad (9)$$

Із виразу (9) отримуємо $x_k = \frac{h}{4}$. Щодо нашого випадку:

$$x_k = \frac{100}{4} = 25 \text{ м.}$$

Таким чином, за новим комплексним дисперсійно-частотним показником відхилення траєкторії рядків просапної культури від прямої лінії можна вважати прийнятними, якщо дисперсія цього процесу не перевищує $12,5 \text{ см}^2$, а інтервал кореляції — не менший 25 м. Тобто:

$$\begin{aligned} D_x &\leq 12,5 \text{ см}^2; \\ x_k &\geq 25 \text{ м.} \end{aligned} \quad (10)$$

Фрагмент графічної інтерпретації кореляційної функції (7) у нормованому її варіанті R_{xn} представлений на рис. 2. Розрахунок цієї функції здійснено за такою формулою:

$$R_{xn} = \frac{\cos \pi}{50} x. \quad (11)$$

Експериментальні дослідження посівного машинно-тракторного агрегата проводили за таких умов: вологість ґрунту — 18,6%, щільність ґрунту — $1,14 \text{ г/см}^3$, робоча швидкість руху посівного агрегата — $2,2 \text{ м/с}$ ($7,9 \text{ км/год}$).

На період заміру коливань траєкторії рядків соняшнику вологість ґрунту становила 17,4%, а щільність — $1,21 \text{ г/см}^3$.

Нормована кореляційна функція коливань траєкторій рядків просапної культури (соняшнику), отримана на основі експериментальних даних, представлена на

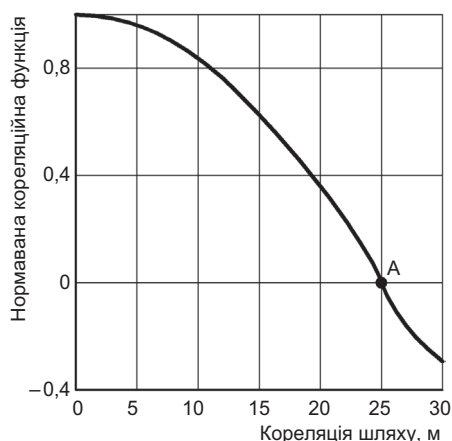


Рис. 2. Розрахункова нормована кореляційна функція (7) відтворення процесу відхилення траєкторії рядка просапної культури від прямої лінії

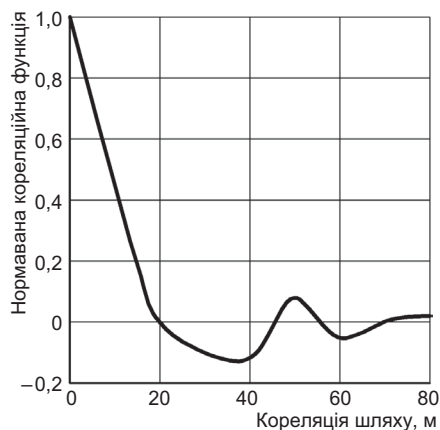


Рис. 3. Експериментальна нормована кореляційна функція процесу коливань траєкторії рядків посівів соняшнику

рис. 3. Дисперсія цього процесу становить $6,44 \text{ см}^2$.

Як свідчить аналіз рис. 2, розрахункова кореляційна функція набуває нульового значення у точці A, яка визначає зазначений вище інтервал кореляції $x_k = 25 \text{ м}$. Це точно відповідає тому розрахунковому результату, який отримано із використанням виразів (8) і (9).

Інтервал кореляції дійсної нормованої кореляційної функції (рис. 3) коливань траєкторії рядків соняшнику становить 20 м. Це на 20% менше за оціночний $x_k = 25 \text{ м}$.

Досить складно визначити, наскільки це — проблематично. Тим більше, що дійсна дисперсія коливань траєкторій рядків висіяної культури становить лише $6,44 \text{ см}^2$. Це — майже вдвічі менше за оціночний показник $D_x \leq 12,5 \text{ см}^2$.

Логічно припустити, що у нового комплексного показника дисперсійна складова D_x є більш значущою і визначальною, ніж частота x_k . На користь цього свідчить наступний факт. Конструктивні параметри сучасних посівних машинно-тракторних агрегатів нині обґрунтовано на такому рівні, що майже неможливе відносно високочастотний характер їх коливань у горизонтальній площині.

Дисперсія коливань більша за $12,5 \text{ см}^2$ навіть за досить низькочастотного характеру плоско-паралельного руху таких машинно-тракторних агрегатів цілком можлива. У підсумку ситуація, зумовлена другою обставиною, є більш несприятливою для здійснення міжрядного обробітку сходів просапної культури.

З огляду на це непрямої рядків соняшнику, посіяного агрегатом у складі трактора ХТЗ-16131 і сівалки Leda-12, згідно із запропонованим комплексним оцінювальним показником (10) є цілком прийнятною за дисперсією коливань відхилень траєкторій рядків від прямої лінії, і близька до прийнятної за частотою цих коливань.

Слід підкреслити, що аналогічних показників оцінювання непрямої рядків сільськогосподарських культур принаймні на теренах Європи не виявлено. Переважно вважається, що рівні (прямі) рядки сходів можуть і мають використовуватися, як стаціонарні орієнтири для реалізації алгоритмів навігаційних систем [10,18]. Для сходів таких культур важливими показниками є повнота ряду, розмір рослин, наявність бур'янів тощо [1].

Для ведення агрегату вздовж рядка рослин застосовують кольорові [14] або навіть монохромні камери відео спостереження [3, 7]. Широкого використання набувають лазерні [1], ультразвукові [8] та інші пристрої і системи.

Чітких вимог до непрямої рядків просапних чи інших сільськогосподарських культур у наукових розробках не виявлено. Водночас, зазначений вище аналіз засвідчує потребу таких вимог, адже максимальне наближення до прямої лінії траєкторії рядків сходів просапних культур, зменшує ускладнення під час їх подальшого обробітку. Зокрема, під час застосування різноманітних систем локації та навігації.

Запропонований нами у цій статті алгоритм визначення комплексного дисперсійно-частотного показника непрямої рядків просапних культур є досить простим і містить такі кроки:

- вибір на полі будь-якого рядка сходів просапної культури;
- прокладання паралельно цьому рядку шнура (шпагату) довжиною не менше 200 м;
- вимірювання найкоротшої відстані від шнура (шпагату) до осі рядка просапної культури. Кількість вимірювань — не менше 200, крок вимірювань — 1 м;
- використання отриманих вимірювань для розрахунку дисперсії D_x відхилень траєкторії рядка просапної культури від прямої лінії і нормованої кореляційної функції цих відхилень;
- визначення на основі аналізу розрахованої нормованої кореляційної функції інтервалу кореляції x_k ;
- оцінювання непрямої сходів просапної культури на основі порівняння реальних значень D_x і x_k із нормативними за умовою (10).

Висновки

Непрямої рядків посівів будь-якої просапної культури може бути оцінена комплексним дисперсійно-частотним показником, який прямо репрезентує енергію і опосередковано — частоту відхилень траєкторій сходів цієї культури від прямої

лінії. Першою складовою цього комплексного показника є дисперсія вказаних відхилень D_x , а другою — інтервал кореляції x_k нормованої кореляційної функції коливань досліджуваного процесу.

Установлено, що непрямої рядків

рядків багатьох просапних культур можна вважати прийнятною, якщо дисперсія їх відхилень від прямої лінії не перевищує $12,5 \text{ см}^2$, а інтервал нормованої кореля-

ційної функції цих відхилень не менший ніж 25 м . Із двох складових цього комплексного показника — D_x і x_k — більш визначальним пропонують приймати перший.

Adamchuk V.¹, Bulgakov V.², Nadykto V.³, Kyurchev V.⁴, Ihnatiev Ye.⁵, Boris M.⁶

¹National Scientific Centre of "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture", 11, Vokzalna Str., Hlevakha vil., Fastivskiyi Dist., Kyiv oblast, Ukraine, 08631; ²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroyiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine, 03041; ³, ⁴, ⁵Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University, 18, B. Khmelnytsky Ave., Melitopol, Zaporozhzhie oblast, Ukraine, 72310, ⁶State Agrarian and Engineering University in Podillia, Kamianets-Podilskiyi, Khmelnytskyi oblast, 13, Shevchenko Str., Ukraine, 32316.; e-mail: ¹vvadamchuk@gmail.com; ²vbulgakov@meta.ua; ³volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua; ⁴office@tsatu.edu.ua; ⁵yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua, ⁶mvapk@pdatu.edu.ua; ORCID: ¹0000-0003-0358-7946, ²0000-0003-3445-3721, ³0000-0002-1770-8297, ⁴0000-0003-4377-1924, ⁵0000-0003-0315-1595, ⁶0000-0003-0677-9505

The study of misalignment of rows of row cultures using a new indicator

Goal. To assess effectively and accurately the misalignment of rows of row crops using the developed new agro engineering method based on the use of the complex dispersion frequency indicator. **Methods.** The theoretical preconditions for solving this problem are made using the basic principles of probability theory and mathematical statistics. The method of obtaining and analyzing experimental data is carried out using elements of analysis

of variance and correlation of random oscillatory processes. **Results.** The correlation function of the process of deviation of the trajectories of rows of row culture from a straight line and the variance of these deviations D_x are determined theoretically. Due to the analysis of the obtained correlation function, the correlation interval x_k was determined, which represents the frequency component of the oscillations of the studied harmonic process. As a result, it was found that the misalignment of rows of row culture can be considered acceptable if the dispersion of their oscillations D_x does not exceed 12.5 cm^2 , and the correlation interval of the normalized correlation function x_k is greater than 25 m ., sown with a tractor HTZ16131 and seeder Leda12, is acceptable in dispersion D_x ($6,44 \text{ cm}^2$) and close to acceptable in the correlation interval x_k (20 m). **Conclusions.** The misalignment of the rows of any row crop can be estimated by a complex dispersion frequency indicator, which directly represents the energy and indirectly — the frequency of deviations of the trajectories of the seedlings of the culture from a straight line. The first component of this complex indicator is the variance of these deviations, and the second is the correlation interval of the normalized correlation function of oscillations of the studied process.

Key words: row culture, row, theoretical researches, field tests, variance, correlation function, complex indicator.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202108-05>

Бібліографія

1. Ahamed T., Kulmutiwat S., Thanpattranon P., Tuntiwut S., Ryozyo N., Takigawa T. Monitoring of plant growth using laser range finder. 2011 ASABE Annual International Meeting Louisville, Kentucky. 2011. Paper Number 1111373. doi:10.13031/2013.37802
2. Alimova F.A., Primulov B.Sh. Probabilistic characteristics of processes in models of the operation of row crop cultivator aggregates. Technical science and innovation. 2019. V. 3. P.275–282. doi:10.51346/tstu-01.19.3.-77-0032
3. Benson E., Reid J., Zhang Q. Machine vision-based guidance system for agricultural grain harvesters using cut-edge detection. Biosystems Engineering. 2003. V.86. P.389–398. doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.07.002
4. Брагінець М.В., Поляков Б.А., Фесенко Г.В.,

Поляков А.М. Удосконалення технологічних властивостей сільськогосподарського агрегату. Інженерія природокористування. 2019. Вип. 1(11). С. 103–108.

5. Чорна Т.С. Результати польових досліджень прямої лінійності рядків просапної культури. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2012. Вип. 2. Т. 5. С. 233–237.

6. Cooper G.R., McGillen C.D. Probabilistic Methods of Signal and System Analysis. New York: Holt, Rinehart, and Winston. 1989.

7. Han S., Zhang Q., Ni B., Reid J. A guidance directrix approach to vision-based vehicle guidance systems. Computers and Electronics in Agriculture. 2004. V.43. P.179–195. doi:10.1016/j.compag.2004.01.007

8. Harper N., McKerrow P. Recognising plants with ultrasonic sensing for mobile robot navigation. Robotics and autonomous systems. 2001. V.34. P.71–82. doi:10.1016/S0921-8890(00)00112-3
9. Лахмаков В.С., Бондаренко И.И. Анализ исследований рабочих органов при посадке картофеля. *Панорама*. 2007. Вып.10. С. 25–29.
10. Li M, Ito K., Wakabayashi K., Yokoyama S. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. V.2. P.1–16. doi:10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.001-016
11. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. Ленинград: Колос, 1970. 376 с.
12. Надькто В.Т., Назарова О.П., Черная Т.С. Частотно-дисперсионный показатель оценки непрямолинейности рядов пропашных культур. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2009. № 8. С. 15–17.
13. Okamoto H., Hamada K., Kataoka T., Terawaki M., Hata S. Automatic guidance system with crop row sensor. *Proceedings of the Automation Technology for Off-road Equipment, Chicago, USA*. 2002. P.307–316. doi:10.13031/2013.10020
14. Орманджи К.С. Контроль качества полевых работ. Москва: Росагропромиздат, 1991. 189 с.
15. Пожидаев С.П. До питання про вибір показника для оцінки на прямолінійності рядків просапних культур. *Вісник сільськогосподарської науки*. 1980, №11. С. 61–64.
16. Пожидаев С.П., Ляшенко П.Г., Юшин О.О., Голубчик С.Ф., Єфименко М.С., Левітанус А.Д. Тракторні властивості навісного культиваторного агрегату з трактором Т-150К. *Вісник сільськогосподарської науки*. 1980. №11. С.31–35.
17. Shalal N., Low T., Mccarthy C., Hancock N.A. Review of Autonomous Navigation Systems in Agricultural Enviroments. *SEAg 2013: Innovative Agricultural Technologies for a Sustainable Future*. 2013. P.10–26.