



DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-2

УДК 631.372.004.6

Д. П. Журавель¹, д-р техн. наук

ORCID 0000-0002-6100-895X

А. М. Бондар¹, канд. техн. наук

ORCID 0000-0002-4761-9084

*Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*

e-mail: andriy.bondar@tsatu.edu.ua , тел.: +380969362877

МОДЕЛЮВАННЯ КЕРОВАНОСТІ КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ АДАПТИВНОГО РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ

Анотація. У статті проведено моделювання керованості колісних тракторів за допомогою адаптивного рульового керування. Виявлено, що найбільш важливі чинники, що впливають на керованість, включають швидкість руху, передаточне відношення рульового механізму, зовнішні фактори, чутливість рульового керування, тип рульового механізму і людський фактор. Розроблена математична модель адаптивного рульового керування дозволяє імітувати вплив збурюючих факторів на прямолінійність руху трактора, кут його повороту та геометричні параметри, а також швидкість руху, для забезпечення відповідності всім агротехнічним вимогам щодо обробки культурних рослин та якості виконання робіт. Наприклад, при виникненні збурюючих факторів під час міжрядної обробки кукурудзи, основним показником процесу є відхилення від прямолінійності на рівні 10 см при досягненні максимальної технологічної швидкості машинно-тракторного агрегату $V_{max}=4$ м/с.

Ключові слова: колісний трактор, рульове керування, моделювання процесу, передаточне відношення, автоматичний режим, швидкість руху.

Постановка проблеми. В даний момент використання натурних експериментів вимагає попередньої апробації на різних симуляторах, що ефективно зберігає кошти та час, а також дозволяє виявити численні недоліки на етапі проектування. Ключовим є розвиток інтерактивних симуляторів, особливо для системи "людина-машинний". Важливо встановити взаємозв'язок між керованістю машинно-тракторного агрегату, умовами руху та параметрами рульового керування. З цієї причини моделюванню підлягає "людина-машинна" система, яка включає в себе різноманітні інформаційні, психологічні та фізичні аспекти. Оператор виступає як найбільш важлива та складна ланка цієї системи, оскільки йому потрібно одночасно враховувати зовнішні умови, підтримувати оптимальний режим роботи двигуна та коригувати роботу МТА згідно з технологічним процесом і змінами умов. Особливе навантаження



психологічне та фізичне отримує водій під час роботи вночі, на схилах та у горах.

Аналіз останніх досліджень. Адаптивне рульове керування може бути ефективним методом для підвищення керованості колісних тракторів. Цей підхід передбачає використання різних технологій та систем для адаптації роботи рульового механізму залежно від різних умов експлуатації та потреб водія. Основні можливі напрямки для підвищення керованості тракторів наступні: електронне рульове керування передбачає використання електроніки для керування рульовим механізмом, що дозволить реалізувати різні режими роботи, зокрема, адаптивне керування [1-8]. Електронні системи можуть аналізувати різні параметри, такі як швидкість руху, тип поверхні, кут нахилу, і на цій основі автоматично коригувати реакцію рульового механізму; вбудовані сенсори, такі як гіроскопи, акселерометри, GPS і інші, можуть надавати інформацію про рух та умови навколишнього середовища [9-12]. Ця інформація може використовуватися для автоматичного адаптивного керування; використання алгоритмів машинного навчання для аналізу даних і прийняття рішень щодо керування [13-18]. Моделі машинного навчання можуть навчатися на основі даних з сенсорів та досвіду водіїв, щоб автоматично підлаштовувати режим керування; використання силових приводів для незалежного керування кожним колесом. Це може дозволити різним колесам рухатися з різною швидкістю або навіть у протилежних напрямках, щоб покращити керованість в різних ситуаціях; використання алгоритмів оптимального керування, які автоматично підлаштовуються до змінних умов дороги та завдань, щоб максимізувати ефективність керування трактором. При впровадженні таких технологій важливо враховувати навчання водіїв та взаємодію цих систем з людьми для забезпечення безпеки та ефективності в реальних умовах експлуатації [19-23].

Існують спроби математично описати поведінку людини, але це часто призводить до недооцінки можливостей людини через спрощення. У сучасній складній техніці активно використовуються комп'ютерні моделюючі комплекси та тренажери. Вони не лише допомагають у тренуванні моторних навичок операторів, але й широко використовуються для отримання оптимальних експлуатаційних показників систем керування та оцінки можливостей нових типів таких систем [24-26].

Зазначений підхід дійсно дозволяє отримати достовірні оцінки керованості складних систем управління, а також синтезувати систему керування, яка враховує можливості людини-оператора та забезпечує високі показники керованості. Крім того, він дозволяє проводити

дослідження нетрадиційних рульових механізмів без необхідності створення складних конструктивних моделей. [27-31].

Формулювання мети статті. Мета математичного моделювання полягає у відтворенні крок за кроком руху транспортного засобу відносно базової лінії з метою отримання надійних показників керованості. Для досягнення цієї мети потрібно знати поточне значення курсового кута α_1 та зміщення визначеної точки транспортного засобу Y . Кожен наступний розрахунок положення проводиться враховуючи властивості рульового колеса, параметри руху (швидкість), поточні значення керуючого та збурюючих впливів. У цьому контексті математична модель повинна враховувати кінематичні характеристики транспортного засобу.

Основна частина. Побудова математичної моделі ґрунтується на двоточковій «велосипедній» моделі. Тому для визначення положення об'єкта на площині потрібно знати дві точки або одну точку разом з курсовим кутом. Відповідно до цього схема процесу керування МТА вздовж базової лінії матиме такий вигляд (рис. 1).

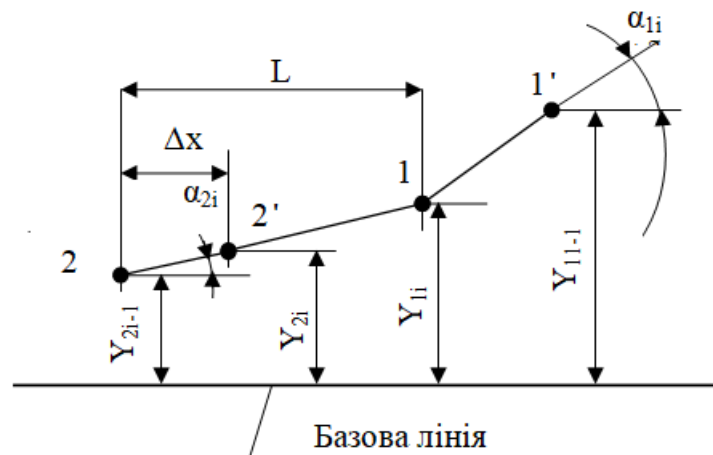


Рис. 1. Схема перетворювання координат для розрахунку параметрів дискретних моделей: L – довжина колісної бази трактора; α_1 – кут повороту передніх керуючих коліс; α_2 – поточне значення курсового кута; Y_1 , Y_2 – поточне значення відхилень від базової лінії переднього та заднього коліс трактора відповідно; Δx – шаг квантування моделі по переміщенню.

Для побудови математичної моделі процесу руху транспортного засобу вздовж базової лінії були прийняті наступні припущення:

– швидкість реакції водія-оператора МТА є постійною і не перевищує 2.5 секунд.

– вплив факторів, таких як люфт у рульовому механізмі, зв'язок між еластичною шиною та дорожнім покриттям, коливання бічної сили на осях МТА, ураховується у вигляді кута уводу δ , який має нормальний закон розподілення і генерується програмою.



Обмеження включають:

- зміна швидкості МТА від 1 до 4 м/с (3.6 – 14.4 км/год).
- передаточне відношення рульового механізму традиційного та експериментального варіантів.
- збурюючі впливи зовнішніх факторів на керуючі колеса.

Розроблена математична модель рульового керування з постійною чутливістю забезпечує сумісність високої маневреності і стабільності руху МТА на підвищених швидкостях.

Результатом є випадковий процес руху МТА вздовж базової лінії під керуванням оператора, який можна описати за допомогою дискретної математичної моделі.

$$\begin{cases} \alpha_{1i} = \frac{\alpha_i}{W}; & \Delta x = V_i \cdot \Delta t; \\ \alpha_{3i} = \frac{(Y_{1i-1} - Y_2)}{L}; \\ Y_{1i} = Y_{1i-1} + (\alpha_{3i} + \alpha_{1i} + \delta_i) \cdot \Delta x; \\ Y_{2i} = Y_2 + \alpha_{3i} \cdot \Delta x \end{cases} \quad (1)$$

де V – швидкість руху МТА;

W – передаточне відношення рульового механізму;

Δt – крок квантування по часу (0,05 с);

δ – значення збурюючого кута уводу еластичних шин.

Під час руху МТА відхиляється від заданої траєкторії через вплив зовнішніх збурюючих факторів, що вимагає постійних корегуючих дій оператора за допомогою рульового колеса.

У двохканальній схемі рульового керування передаточне відношення обчислюється таким чином:

$$W_i = W \left(1 + \frac{V}{V_0} \right), \quad (2)$$

де V_0 – середнє значення швидкісного діапазону МТА (const).

Для проведення досліджень математичної моделі був створений комп'ютерний симулятор, який дозволяє виконувати віртуальні заїзди в інтерактивному режимі. У процесі таких досліджень порівнювалися результати керування МТА з традиційним рульовим механізмом та адаптивним рульовим механізмом зі змінним передаточним відношенням.

Враховуючи рівняння (2), систему (1) можна записати у наступному вигляді:



$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta x = V_i \cdot \Delta t ; \\ W_i = W \left(1 + \frac{V_i}{V_0} \right) \\ \alpha_{1i} = \frac{\alpha_i}{W_i} ; \\ \alpha_{2i} = \frac{(Y_{1i-1} - Y_2)}{L} ; \\ Y_{1i} = Y_{1i-1} + (\alpha_{3i} + \alpha_{1i} + \delta_i) \cdot \Delta x ; \\ Y_{2i} = Y_2 + \alpha_{3i} \cdot \Delta x \end{array} \right. \quad (3)$$

Розроблене програмне забезпечення надає можливість безперервно проводити всі три етапи дослідження:

– введення даних: користувач може вводити необхідні параметри та налаштування для проведення симуляцій.

– імітаційне моделювання: програма виконує симуляцію руху транспортного засобу згідно з введеними даними та параметрами.

– обробка результатів: отримані результати симуляцій підлягають аналізу та обробці, що дозволяє користувачеві отримати необхідну інформацію для подальшого аналізу та прийняття рішень.

Узагальненим показником, який відображає якість керування колісною машиною є величина добротності. Її можливо розрахувати наступним чином:

$$D = \frac{V}{\sigma_t}, \quad (4)$$

де D – добротність керування «людино-машинної» системи;

V – швидкість руху МТА на контрольній ділянці;

σ_t – середнє квадратичне відхилення фактичної траєкторії МТА від базової лінії.

Для отриманих у результаті моделювання даних були обчислені моменти й визначені числові характеристики.

Сутність експериментального моделювання полягає у визначенні максимальної добротності на підвищених швидкостях руху МТА. Для цього ми враховуємо наступні припущення та умовності:

– швидкість МТА буде змінюватися в діапазоні від 1 до 4 м/с (3.6–14.4 км/год).

– передаточне відношення рульового механізму для стандартного та експериментального варіантів.



– збурюючі впливи зовнішніх факторів впливають на керуючі колеса.

– початок збору даних відбувається лише після досягнення МТА визначеної швидкості руху.

– довжина колісної бази складає 2,7 метра.

Отримані в результаті експерименту дані піддаються обробці, де обчислюються моменти й визначаються числові характеристики за допомогою формул математичної статистики. [23-26].

Для вибірки об'єму N (одномірний масив x_i) отримані:

– початкові моменти k – го порядку ($k = 1 \div 4$)

$$m_k(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^k, \quad (5)$$

– середнє значення абсолютних величин вибірки, (а також розмах вибірки)

$$m_1(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|, \quad (6)$$

– центральні моменти k – го порядку ($k = 1 \div 4$)

$$M_2 = m_2 - m_1^2, \quad (7)$$

$$M_3 = m_3 - 3m_1m_2 + 2m_1^3, \quad (8)$$

$$M_4 = m_4 - 4m_1m_3 + 6m_1^2m_2 - 3m_1^4, \quad (9)$$

– середнє значення

$$\bar{x} = m_1(x), \quad (10)$$

– дисперсія

$$D = M_2, \quad (11)$$

– виправлена дисперсія

$$D_o = \frac{N}{N-1} \cdot M_2, \quad (12)$$

– стандартне відхилення

$$\sigma_o = \sqrt{D_o}, \quad (13)$$

– асиметрія

$$A_s = \frac{M_3}{\sigma^3}, \quad (14)$$

– ексцес

$$E = \frac{M_4}{\sigma^4} - 3, \quad (15)$$

Визначення відповідності розподілення даних нормальному закону було здійснене шляхом порівняння значень коефіцієнтів



асиметрії та ексцесу, а також стандартних відхилень на основі відповідних формул:

$$U_3 = \sqrt{\frac{6(N-1)}{(N+1)(N+3)}}, \quad (16)$$

$$U_4 = \sqrt{\frac{24(N-2)(N-3)N}{(N-1)^2(N+3)(N+5)}}, \quad (17)$$

При

$-|A_s| \leq 2 \cdot U_3$, $|E| \leq 2U_4$ – розподіл досить близький до нормального (правило трьох сигм);

$-2U_3 < |A_s| \leq 3 \cdot U_3$, $2U_4 < |E| \leq 3U_4$ – розподіл, близький до нормального за скошеністю та гострокутністю, можна вважати підкореним нормальному закону розподілу. У випадку, коли розподіл не відповідає цим характеристикам, він не підкоряється нормальному закону розподілу.

Для перевірки діючого стенда додатково були проведені розрахунки числових характеристик для випадкових величин X (відхилення трактора від базової лінії) і Y (відхилення рульового колеса від нейтрального положення) в пакеті Mathcad та перевірка на нормальний закон розподілу.

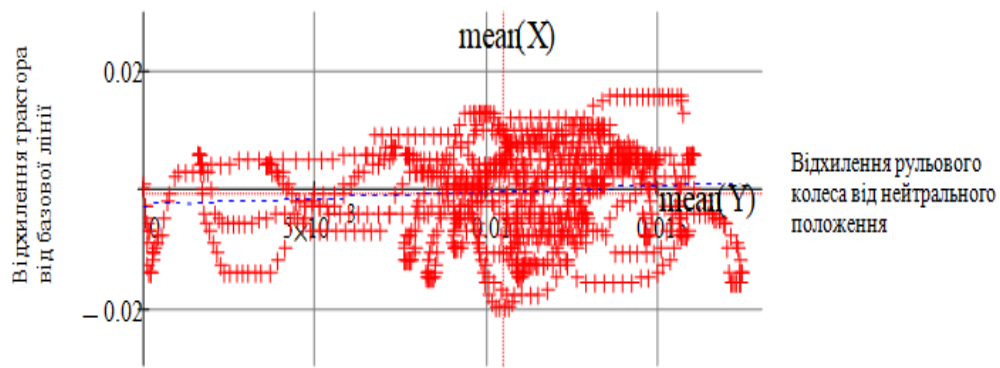
Крім того, був проведений регресійний аналіз і визначений коефіцієнт кореляції між двома випадковими величинами X і Y .

$$r_{xy} = \frac{m_2(X, Y) - m_1(X) \cdot m_1(Y)}{\sqrt{m_2(X) - m_1(X)^2} \cdot \sqrt{m_2(Y) - m_1(Y)^2}} \quad (18)$$

$$a = r_{xy} \frac{\sigma_Y}{\sigma_X}, \quad b = \bar{Y} - a\bar{X}. \quad (19)$$

Обробка даних розглядалася в пакеті Statistica 6 і Mathcad.

Для розглянутих вибірок можна зробити висновок, що випадкові величини підпорядковуються нормальному закону розподілу. У той же час, лінійні залежності для кореляційного аналізу мають низький коефіцієнт кореляції, що свідчить про слабку лінійну залежність між ними. На діаграмах розсіювання спостерігається нелінійна залежність, де крапки формують овальну "хмару", що підтверджує відсутність прямої лінійної залежності між випадковими величинами.



де +++ - відповідні значення X та Y;

..... - середнє значення величини X;

---- - середнє значення величини Y.]

Рис. 2. Регресійний аналіз значень X та Y

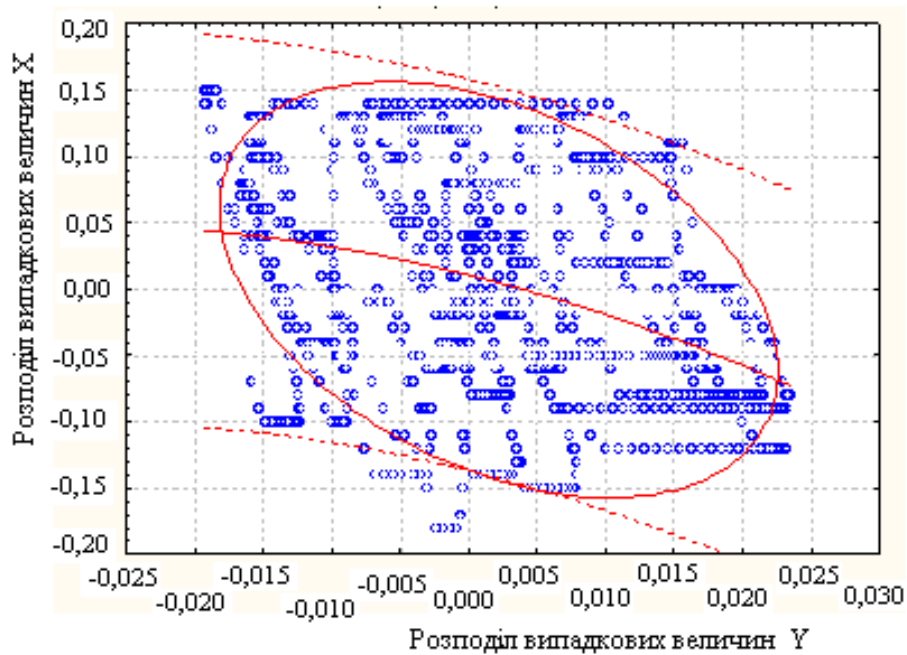


Рис. 3. Залежність розсіювання випадкових величин X і Y

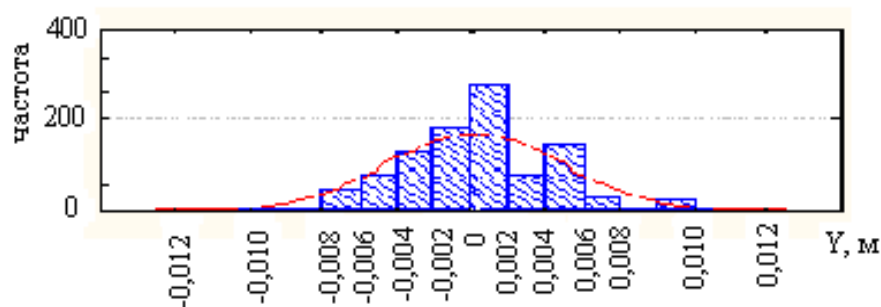


Рис. 4. Гістограма та вирівняна крива розподілу значень відхилення МТА від базової лінії Y

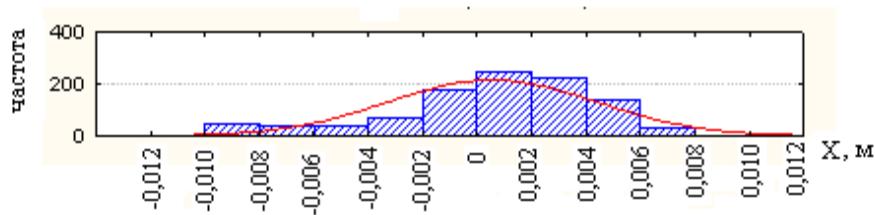


Рис. 5. Гістограма та вирівняна крива розподілу значень змінної кута повороту рульового колеса X

Для випадкової величини Y відзначається гостровершинність щодо нормального закону розподілу, це може свідчити про те, що розподіл даних має виражену вершину (пікову частину) у порівнянні з нормальним розподілом.

Тоді результати можна записати в наступному вигляді:

$$Y=0,0014+0,1813 \cdot x-27,5303 \cdot x^2$$

Такий підхід до дослідження діаграм розсіювання для вибору відповідного перетворення даних є важливим. Це дозволяє виявити форму залежності між змінними та вибрати оптимальне перетворення для "лінеаризації" дискретних значень змінних.

Швидко пряме перетворення Фур'є (ШПФ) дозволяє отримати спектральну характеристику даних.

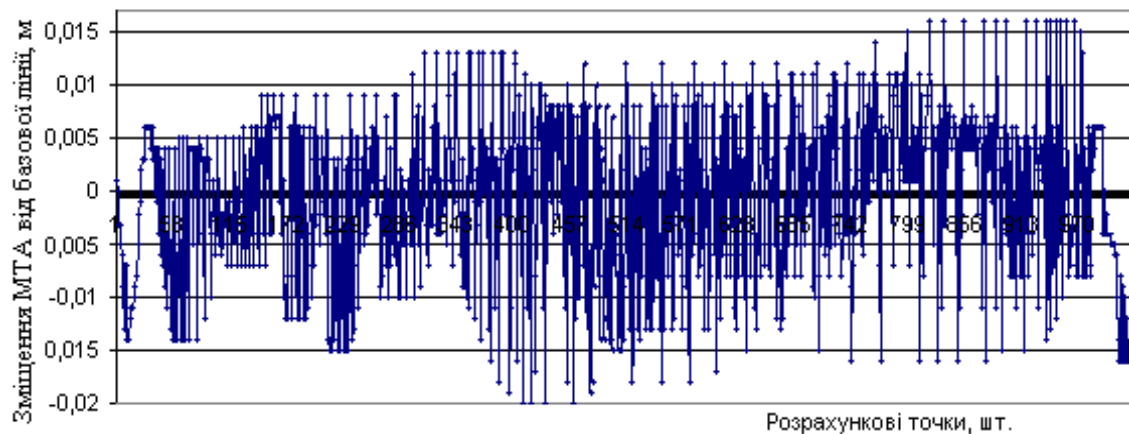


Рис. 6. Вихідні модельні дані для швидкого перетворення Фур'є

Лістинг демонструє розрахунок Фур'є спектра по $N = 256$ точках, причому передбачається, що інтервал дискретизації даних y_i дорівнює Δ .

У середині лістингу застосовується вбудована функція $\text{fft}(V)$, інша частина призначена для коректного перерахунку відповідних значень за результатами аналізу. Після виконання спектрального аналізу і отримання спектральних характеристик можна виконати перетворення або коригування вихідних даних для поліпшення їх точності або зменшення шуму Ω_i частот.

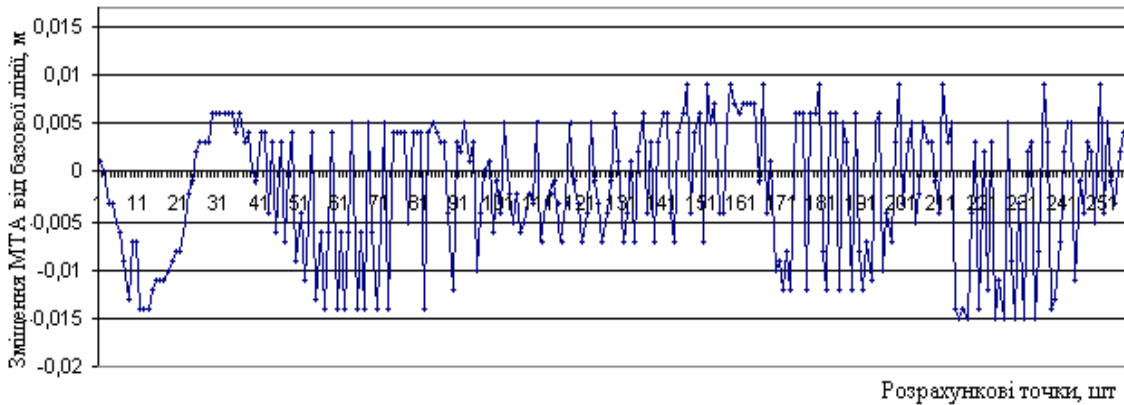


Рис. 7. Модельні дані для вибірки об'єму $N = 256$

В передостанньому рядку лістингу два параметри, які називаються граничною частотою і частотою Найквіста. Гранична частота – це частота, на якій відсоток від максимальної амплітуди сигналу зменшується до певного значення (зазвичай 3 децибел), вказуючи на початок затухання сигналу у фільтрі. Гранична частота Ω_0 визначає нижню межу Найквіста, Ω_N – верхню межу аргументу обчислення спектра.

Для розрахунку зворотнього Фур'є-перетворення (відновлення сигналу за його спектром) можна використовувати вбудовані функції для обробки сигналів або математичних обчислень. Ці функції дозволяють виконувати обернене перетворення Фур'є за допомогою зразка спектра:

$ifft(v)$ – вектор зворотнього дійсного перетворення Фур'є;

v – вектор даних, Фурє-спектра, який береться через рівні проміжки значень частоти.

$\Omega D_i =$	$a_i =$	$z_i =$	$y_i =$
58.824	0.384	0	$3.376 \cdot 10^{-3}$
117.647	0.082	1	$6.976 \cdot 10^{-3}$
176.471	0.04	2	$6.445 \cdot 10^{-5}$
235.294	0.028	3	$3.491 \cdot 10^{-3}$
294.118	0.019	4	$6.323 \cdot 10^{-3}$
352.941	0.016	5	$6.819 \cdot 10^{-3}$
411.765	0.012	6	$2.775 \cdot 10^{-3}$
470.588	0.012	7	$3.16 \cdot 10^{-3}$
529.412	$9.679 \cdot 10^{-3}$	8	$3.472 \cdot 10^{-3}$
588.235	$8.672 \cdot 10^{-3}$	9	$1.169 \cdot 10^{-3}$
647.059	$4.127 \cdot 10^{-3}$	10	$2.26 \cdot 10^{-3}$
705.882	$9.52 \cdot 10^{-3}$	11	$7.852 \cdot 10^{-3}$
764.706	$8.24 \cdot 10^{-3}$	12	$1.883 \cdot 10^{-3}$
823.529	$5.365 \cdot 10^{-3}$	13	$1.215 \cdot 10^{-3}$
882.353	$7.627 \cdot 10^{-3}$	14	$6.027 \cdot 10^{-3}$
...	...	15	...

	0
0	1.618
1	1.513
2	1.335
3	1.219
4	1.181
5	1.087
6	0.839
7	0.516
8	0.274
9	0.159
10	0.048
11	-0.171
12	-0.446
13	-0.619
14	-0.632
15	...

$\text{iff}(a) =$

	0
0	$3.672 \cdot 10^{-3}$
1	0.339
2	0.543
3	0.648
4	0.792
5	1.036
6	1.26
7	1.328
8	1.257
9	1.195
10	1.234
11	1.271
12	1.177
13	0.954
14	0.747
15	...

$\text{iff}(z) =$

Зворотнє Фур'є-перетворення може відновити сигнал з великою точністю, але при цьому може втрачатися інформація про фазу сигналу. Це через те, що Фур'є-перетворення перетворює сигнал з часового домену в частотний, а при зворотньому перетворенні ми отримуємо знову сигнал у часовому домені, але фазова інформація може бути втрачена.

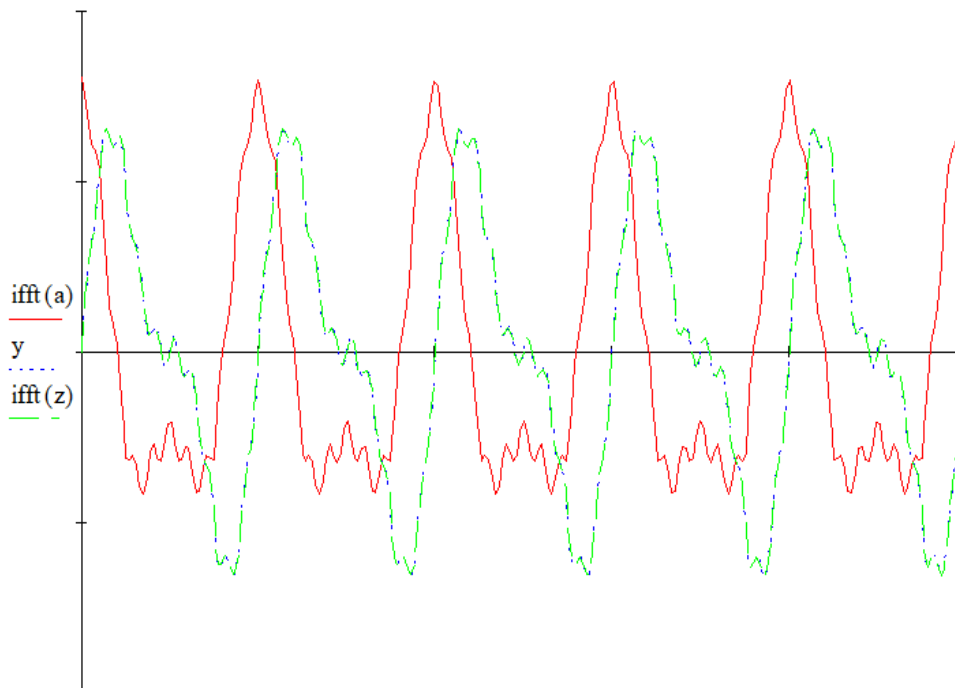


Рис. 8. Зворотнє перетворення Фур'є

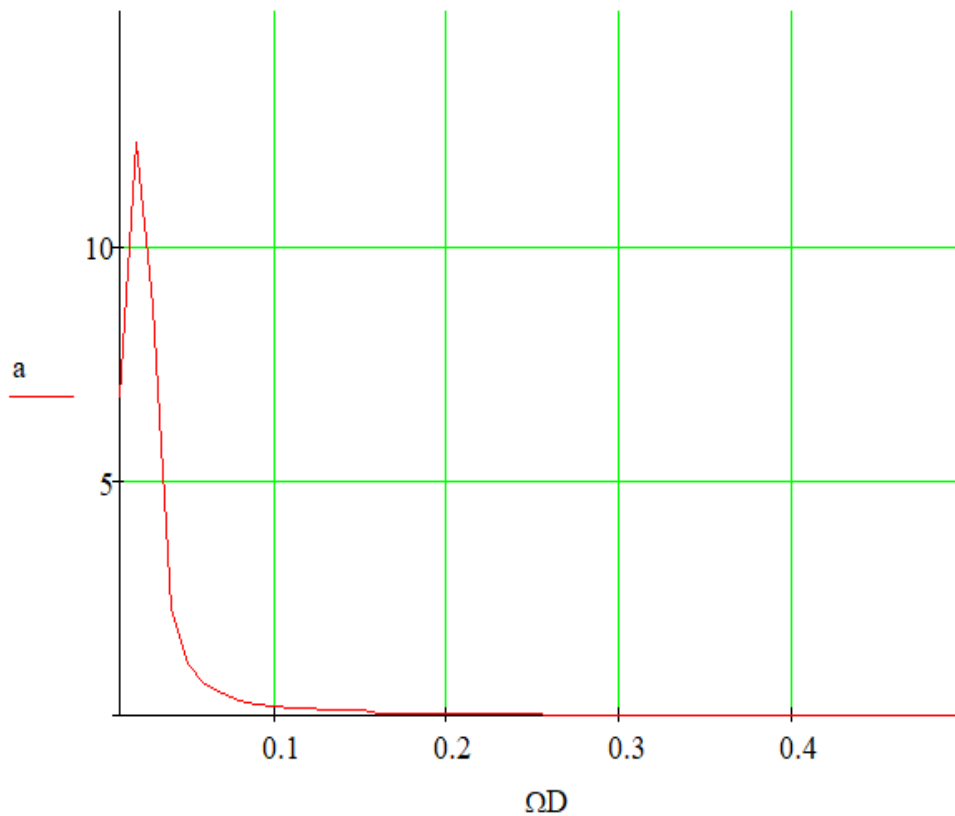


Рис. 9. Графік Фур'є-спектра даних

Алгоритм розрахунку спектра потужності за Фур'є-перетворенням кореляційної функції складається з наступних етапів:

- обчислення автокореляційної функції сигналу.
- проріджування і згладжування автокореляційної функції для зменшення впливу кінцівки вибірки.
- розрахунок Фур'є-перетворення згладженої автокореляційної функції.

Процедура згладжування може включати проріджування та фільтрацію автокореляційної функції для зменшення впливу шуму та кінцівки вибірки, що допомагає покращити якість отриманого спектру потужності. Зазвичай застосовуються методи згладжування за трьома та п'ятьма точками для отримання більш точних результатів.

Отриманий спектр потужності дає інформацію про розподіл потужності сигналу в залежності від частоти, що дозволяє провести детальний аналіз спектральних характеристик сигналу.

Крім цього виділені гармоніки з максимальною амплітудою по формулах:

$$T_1 = \sum_{i=0}^{N/2-1} A_i \cdot i, \quad (20)$$

$$T_2 = \sum_{i=0}^{N/2-1} A_i \quad (21)$$

$$\nu_{хар} = \frac{T_1 \cdot N}{T_2 \cdot \Delta t} \quad (22)$$

$$A_{хар} = \frac{2T_2}{N}, \quad (23)$$

де A_i – амплітуда гармоніки;

i – номер гармоніки, що визначає число коливань за час $N \cdot \Delta t$;

N – число реалізацій аналізованого процесу;

Δt – крок дискретизації за часом;

$\nu_{хар}$ – характерна частота в Герцах;

$A_{хар}$ – характерна амплітуда (середня) процесу.

Спектральний аналіз представлений на рисунку 10.

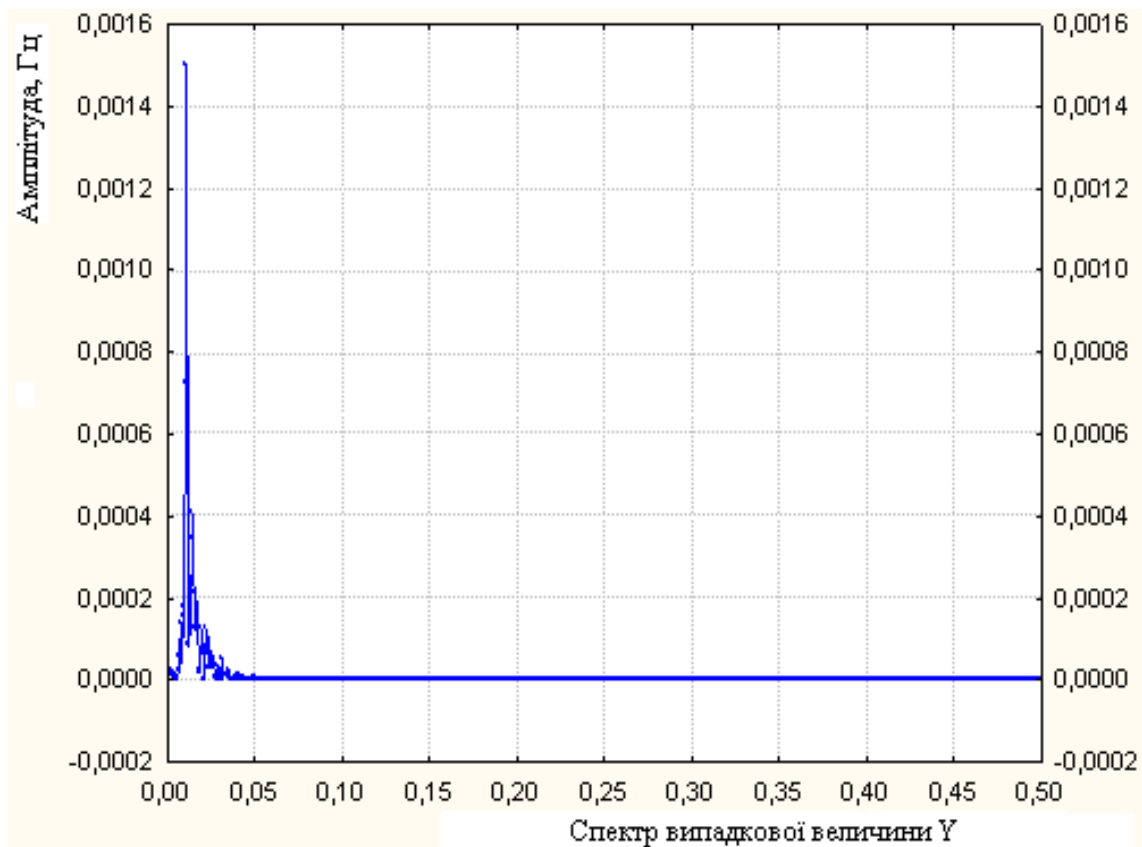


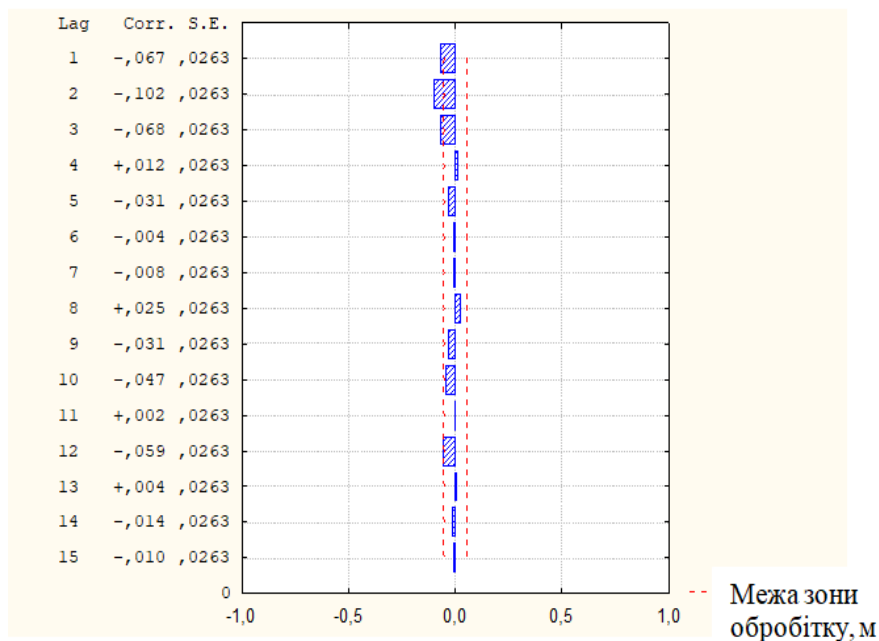
Рис. 10. Спектральний аналіз випадкової величини Y

Значення автокореляційної функції представлені в таблиці 1

Таблиця 1

Автокореляційні значення та похибки

№	Автокореляція	Стандартна похибка
1	0,98	0,03
2	0,96	0,03
3	0,93	0,03
4	0,90	0,03
5	0,85	0,03
6	0,80	0,03
7	0,75	0,03
8	0,69	0,03
9	0,63	0,03
10	0,57	0,03
11	0,50	0,03
12	0,43	0,03
13	0,36	0,03
14	0,29	0,03
15	0,23	0,03

Рис. 11. Автокореляційна функції Y зсуву випадкових величин (зміщення трактора) від базової лінії

Автокореляційні функції X і Y дають можливість охарактеризувати зсув випадкових величин від базової лінії.

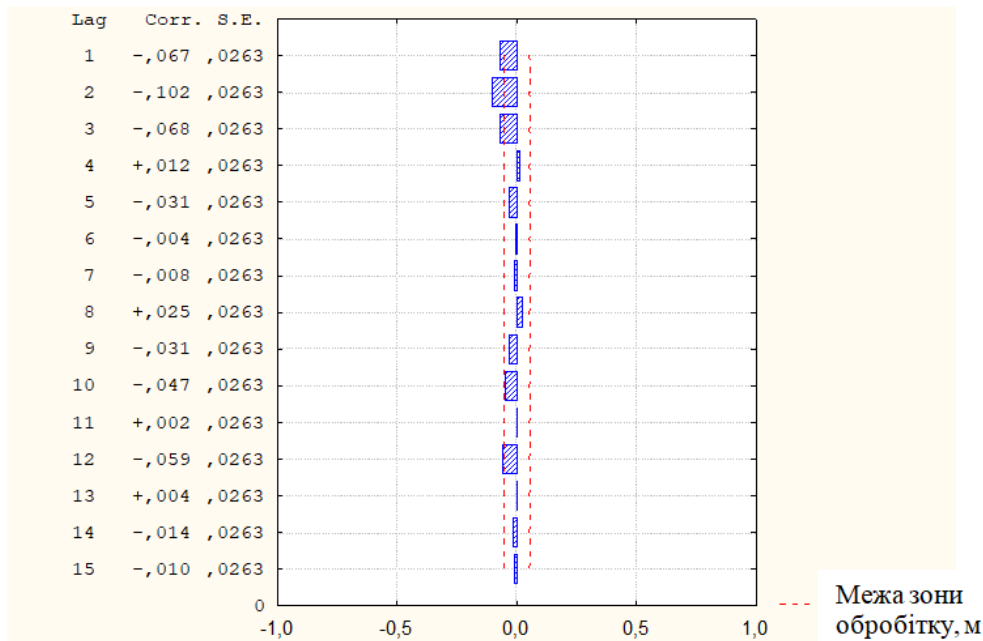


Рис. 12. Автокореляційна функції X зміщення рульового колеса відносно нейтрального положення

Процедура усунення постійного компонента «білий шум» процесу залежить від виду конкретної траєкторії. Сучасні обчислювальні пакети обробки даних (Statistika) дозволяють досить добре апроксимувати періодичну складову за допомогою поліномів різних ступенів або тригонометричних функцій (рис. 13).

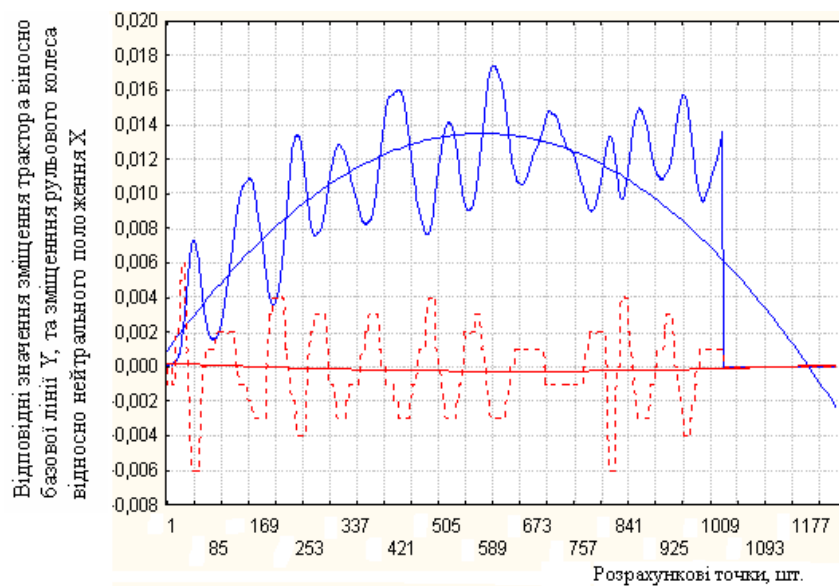


Рис. 13. Апроксимація періодичної складової за допомогою полінома другого порядку

У зв'язку з тим, що добротність залежить від швидкості й стандартного відхилення, при $V = \text{const}$ основним фактором є відхилення від базової лінії. Основна задача – усунути максимальні амплітуди під час руху МТА.

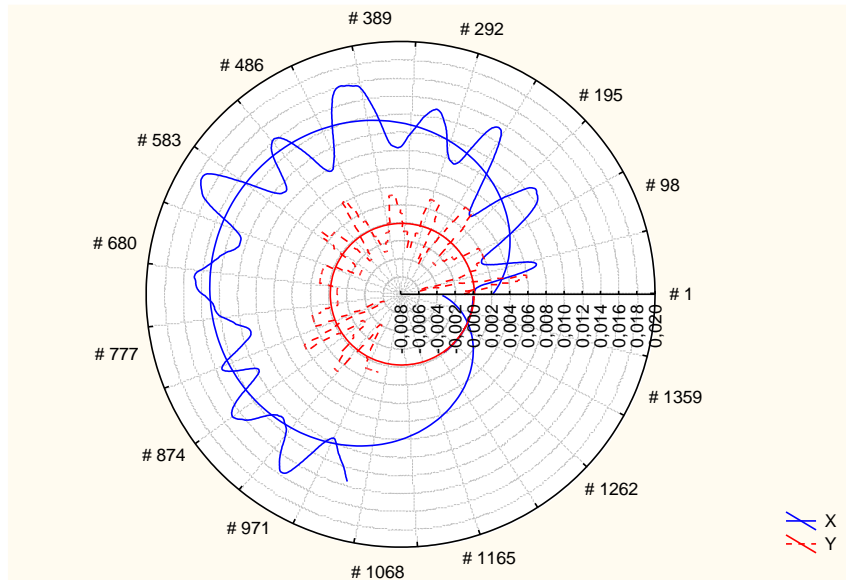


Рис. 14. Апроксимація періодичної складової за допомогою полінома другого порядку в полярній системі координат

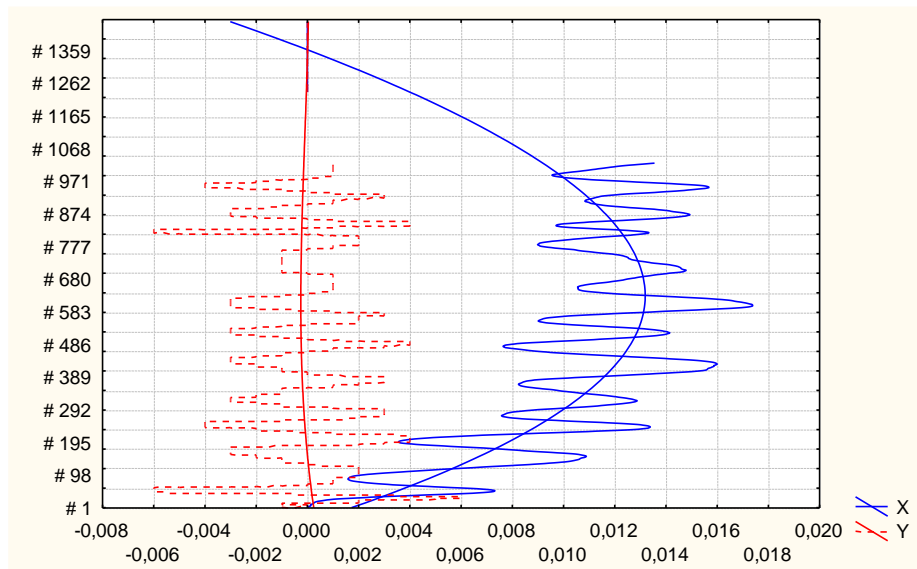


Рис. 15. Апроксимація періодичної складової за допомогою полінома третього порядку

При цьому рівняння змінних величин X та Y у даному випадку мають наступний вигляд:

$$X = 0,0017 + 3,7752E-5x - 3,2914E-8x^2 + 3,1272E-12x^3$$

$$Y = 0,0003 - 1,9094E-6x + 2,1664E-9x^2 - 6,5616E-13x^3$$

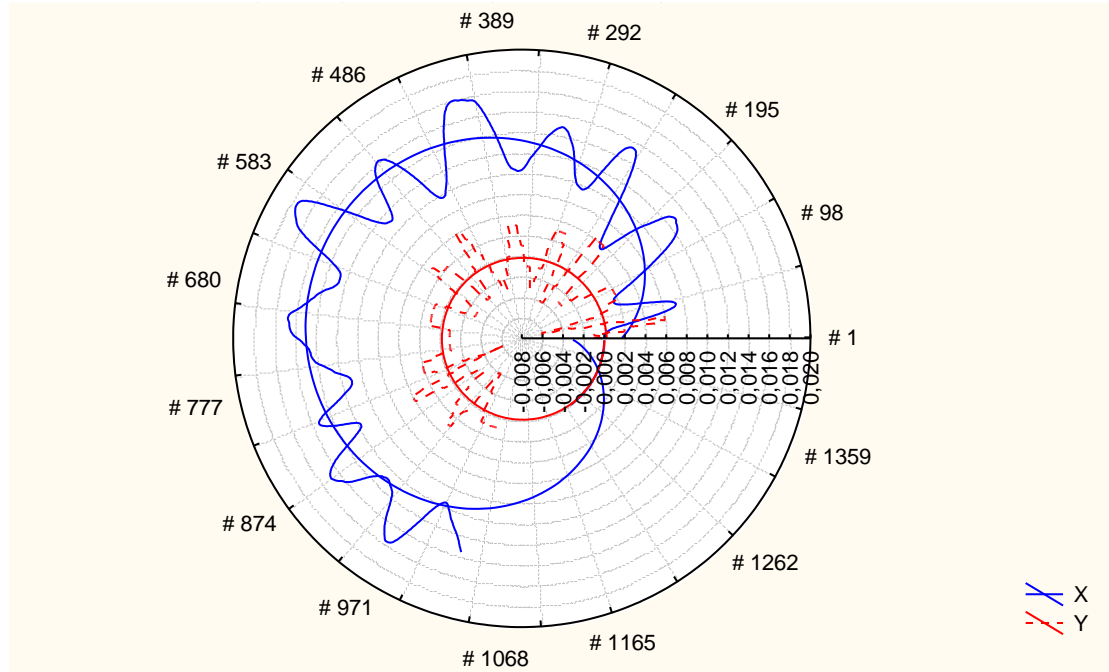


Рис.16. Апроксимація періодичної складової за допомогою полінома третього порядку в полярній системі координат

Висновки. 1. Розроблена методика для дослідження «людино-машинної» системи, яка є досить складною.

2. Розроблено комп'ютерний симулятор, який дозволяє оцінювати технічні показники керованості МТА, як існуючих так і гіпотетичних рульових керувань.

3. Для проведення польового експерименту доцільно провести польові випробування на комп'ютерному симуляторі, тому що натурні дослідження значно витратні.

4. Розроблений підхід дозволяє отримати достовірні оцінки керованості складної системи керування: приведену добротність та середньоквадратичну похибку відслідковування траєкторії руху МТА залежно від його швидкості.

5. Проведені дослідження моделей рульового керування з постійною чутливістю показали значні переваги порівняно з традиційними, особливо на підвищених швидкостях руху МТА.

6. Алгоритм досліджень дає змогу швидко отримати оцінки керованості моделі одразу після віртуального заїзду.

7. Можна рекомендувати підняти технологічну швидкість МТА при виконанні міжрядного обробітку ґрунту до значень, які дозволяє конструкція культиватора ($V_p=4$ м/с (14,4 км/год)), тому що запас стійкості руху МТА при використанні запропонованої системи керування гарантований.

*Список використаних джерел*

1. Петров В. О. Постійна чутливість рульового керування мобільних машин у транспортному режимі. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2006. Вип. 43. С. 98 – 102.
2. Петров В. О. Постійна чутливість рульового керування мобільних машин у транспортному режимі. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2006. Вип. 43. С. 98.
3. Петров В. О. Синтез ергономічних рульових управлінь для мобільних машин. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2000. Вип. 1, т. 17. С. 60-64.
4. Лубяний М. М. Аналіз функціонування системи ”водій-рульове керування” МТА. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2000. Вип. 1, т. 17. С. 21-27.
5. Петров В. О. Рульове управління колісного шасі яке реалізує керування напрямком руху по положенню. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2001. Вип. 1, т. 24. С. 83-86.
6. Журавель Д. П., Бондар А. М. Обґрунтування показників експлуатаційної надійності енергетичних засобів. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції*. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 467-473.
7. Galina Gritsaenko, Igor Gritsaenko. Mechanism for the Maintenance of Investment in Agriculture. *Modern Development Paths of Agricultural Production*. 2019. Ch. 1. P. 29-40.
8. Kyrylo Samoichuk, Olga Viunyk, Dmytro Milko. Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 142-148.
9. Dmytro Milko, Kyrylo Samoichuk, Yulia Postol. Revealing new patterns in resourcesaving processing of chromium-containing ore raw materials by solidphase reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1/12(103). P. 24-29.
10. Dmytro Milko, Oleksandr Sclyar, Radmila Sclyar, Ganna Pedchenko. Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 60(1). P. 269-274.
11. Kyrylo Samoichuk, Nadiya Palyanichka, Vadim Oleksiienko, Serhii Petrychenko. Improving the quality of milk dispersion in a counter-jet homogenizer. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 633-640.
12. Дашивец Г. І. Обґрунтування швидкісних параметрів роботи машино-тракторного агрегату. *Науковий вісник Таврійського*



державного агротехнологічного університету. 2021. Вип. 11, т. 2. 12 с. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-16>.

13. Dmytro Zhuravel. Research of lubricant properties of used tractor motor oils. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2021. Вип. 11, т. 2. 18 с. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-5>.

14. Kuznetsov M., Lysenko O., Chebanov A. Ensuring power balance in a hybrid power system with a backup generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6(8 (114)). P. 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245557>.

15. Дашивець Г. І. Методика обробки емпіричних даних якісних показників роботи колісної машини. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2022. Вип. 12, т. 2. 13 с. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-2-2>.

16. Лебедев А. Т. Тракторная энергетика Украины в период реформирования АПК. *Сб. науч. трудов ХГТУСХ*. 2002. Вып. 6. С. 40-48.

17. Samoichuk K., Petrychenko S., Bondar A., Hutsol T., Kubo' n M., Niemiec M., Mykhailova L., Gródek-Szostak Z., Sorokin D. Modeling of Diesel Engine Fuel Systems Reliability When Operating on Biofuels. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 1795. <https://doi.org/10.3390/en15051795>.

18. Kapłan M., Klimek K., Maj G., Bondar A., Lemeshchenko-Lagoda V., Boltianskyi B., Boltianska L., Syrotyuk H., Syrotyuk S. [et al.]. Method of Evaluation of MaterialsWear of Cylinder-Piston Group ofDiesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 3416. <https://doi.org/10.3390/en15093416>.

19. Журавель Д. П. Вплив технічного обслуговування і ремонту на надійність машин та обладнання при використанні біологічних рідин. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2020. Вип. 10, т. 1. 9 с. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-1-3>.

20. Журавель Д. П. Раціональне використання біологічних олив для мобільних енергетичних засобів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2020. Вип. 10, т. 1. 17 с. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-1-9>.

21. Мілько Д. О. Методика складання раціону великої рогатої худоби на основі поживної цінності кормових компонентів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. Вип. № 10(109). С. 91-96.

22. Дашивець Г. І. Дослідження адаптивної роботи рульового керування транспортного засобу в швидкісному режимі. *Сучасні наукові дослідження на шляху до Євроінтеграції: матеріали міжнар.*



наук.-практ. форуму (21-22 червня 2019 р.): у 2-х ч. / ТДАТУ. Мелітополь, 2019. Ч. 1. С. 203-204.

23 Бондар А. М. Фактори поліпшення керованості МТА. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. 2009. № 2-09. С. 150-160.

24. Бондар А. М. Надійність людини-оператора в складній технічній системі. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2009. Вип. 9, т. 5. С. 13-18.

25. Бондар А. М. Вдосконалення рульових механізмів із перемінним передаточним відношенням. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2010. Вип. 10, т. 2. С. 13-18.

26. Бондар А. М. Використання бальної оцінки для визначення економічної ефективності результатів наукової роботи. *Праці ТДАТУ*. 2012. Вип. 12, т. 1. С. 172-176.

27. Сухенко Ю. Г. [та ін.]. Надійність обладнання харчової галузі: навчальний посібник. Київ: ЦП «Компринт», 2019. 372 с.

28. Дідур В. А. [та ін.]. Гідравліка: підручник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. 624 с.

29. Дідур В. А. [та ін.]. Технічна механіка рідини і газу: підручник для здобувачів ступеня вищої освіти закладів вищої освіти. Мелітополь: ТОВ «Колор Принт», 2019. 468 с.

30. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: підручник для здобувачів вищої освіти / Д. П. Журавель, І. П. Паламарчук, С. М. Уманський, В. І. Паламарчук; за ред. Д. П. Журавля. Київ: ЦП «Компринт», 2021. 448 с., іл.

31. Паніна В. В. та ін. Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання: навчально-методичний посібник до лабораторного практикуму для самостійної роботи. Мелітополь: ВПЦ «Люкс», 2019. 84 с.

Стаття надійшла до редакції 02.04.2024 р.



D. Zhuravel¹, A. Bondar¹

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

SIMULATION OF CONTROLLING WHEEL TRACTORS USING ADAPTIVE STEERING

Summary

The article deals with the issue of controllability of wheeled tractors through the use of adaptive steering. It has been established that the most significant factors affecting the controllability of the machine-tractor unit are the speed of movement, the gear ratio of the steering mechanism, external disturbing factors, the sensitivity of the steering, the type of steering, as well as the human factor. A design scheme was developed and an experimental sample of adaptive steering control was developed, which provides a change in the gear ratio within 2...19, depending on the speed of movement of the machine-tractor unit when performing technological operations during the processing of any row crops grown in Ukraine. The developed mathematical model of adaptive steering control makes it possible to obtain process indicators that ensure compliance with all agrotechnical requirements for cutting cultivated plants and flip quality. For example, with the appearance of disturbing factors that occur during inter-row processing of corn, the main indicator of the process is a deviation from straightness of 10 cm when the machine-tractor unit reaches the maximum technological speed $V_{max}=4$ m/s. Adaptive steering can be an effective method for improving the handling of wheeled tractors. This approach involves the use of various technologies and systems to adapt the operation of the steering mechanism depending on different operating conditions and the needs of the driver. The main possible directions for improving the controllability of tractors are as follows: electronic steering involves the use of electronics to control the steering mechanism, which allows implementing different modes of operation, in particular, adaptive control. Electronic systems can analyze various parameters, such as speed, type of surface, angle of inclination, and on this basis automatically adjust the response of the steering mechanism; built-in sensors such as gyroscopes, accelerometers, GPS and others can provide information about movement and environmental conditions. This information can be used for automatic adaptive control; using machine learning algorithms to analyze data and make management decisions. Machine learning models can learn from sensor data and driver experience to automatically adjust driving mode; Using power drives for independent control of each wheel. This can allow different wheels to move at different speeds or even in opposite directions to improve handling in different situations; using optimal control algorithms that automatically adjust to changing road conditions and tasks to maximize tractor control efficiency. When implementing such technologies, it is important to consider the training of drivers and the interaction of these systems with people to ensure safety and efficiency in real operating conditions.

Keywords: wheeled tractor, steering, process simulation, transmission ratio, automatic mode, speed of movement.