

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

САВЧУК ВАДИМ РОМАНОВИЧ

УДК 631.02.01:633.03.02

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ
ОРНИХ АГРЕГАТІВ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ **В. Р. Савчук**

Керівник роботи

Заєць М. Л.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Савчук Вадим Романович. Обґрунтування основних раціональних параметрів орних агрегатів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У роботі наведено комплексне обґрунтування раціональних конструкційно-технологічних параметрів орних агрегатів, спрямованих на підвищення ефективності основного обробітку ґрунту в системах сучасного землеробства.

Розкрито особливості взаємодії робочих органів плуга з ґрунтовим середовищем та визначено ключові фактори, що формують силовий опір і енергоспоживання машинно-тракторних агрегатів. Проведено аналіз впливу ширини захвату, глибини оранки, швидкісних режимів руху та енергонасиченості трактора на продуктивність і якість виконання технологічного процесу.

Запропоновано методичний підхід до вибору оптимальних параметрів орного агрегату, який включає оцінювання тягово-енергетичних показників, паливної економічності та ступеня використання встановленої потужності двигуна. Значну увагу приділено питанням зменшення енергетичних втрат, раціональному завантаженню. Отримані результати мають практичне значення для удосконалення конструкцій плугів, вибору оптимальних режимів роботи орних машинно-тракторних агрегатів і планування технологічних процесів основного обробітку ґрунту. Матеріали роботи можуть бути використані в інженерній практиці, при виконанні проєктних робіт.

Ключові слова: оранка, орний агрегат, плуг, раціональні параметри, ширина захвату, глибина обробітку, тяговий опір, паливно-енергетична ефективність.

ABSTRACT

Vadym Savchuk. Justification of the Main Rational Parameters of Tillage Units. – *Qualification manuscript.*

Qualification thesis for obtaining the master's degree in specialty 208 Agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The thesis provides a comprehensive justification of rational design and technological parameters of tillage units aimed at improving the efficiency of primary soil tillage in modern farming systems.

The study reveals the interaction features between plough working bodies and the soil environment and identifies key factors influencing draft resistance and energy consumption of tractor–machine units.

An analysis of the influence of working width, ploughing depth, operating speed, and tractor power saturation on productivity and the quality of the tillage process is presented.

A methodological approach is proposed for selecting optimal parameters of a tillage unit, including the assessment of traction and energy indicators, fuel efficiency, and the degree of utilization of the engine's rated power. Considerable attention is given to minimizing energy losses and ensuring rational loading.

The obtained results have practical significance for improving plough designs, selecting optimal operating modes of tillage tractor–machine units, and planning technological processes of primary soil cultivation. The materials of the thesis can be used in engineering practice and in project development.

Keywords: *ploughing, tillage unit, plough, rational parameters, working width, tillage depth, draft resistance, fuel and energy efficiency.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ОРНИХ АГРЕГАТІВ У СИСТЕМАХ ОСНОВНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ	
1.1. Огляд конструктивно-технологічних параметрів роботи полицевих плугів та орних агрегатів.....	7
1.2. Допоміжне обладнання орних агрегатів.....	16
1.3. Порівняльна характеристика плугів до орних агрегатів.....	18
Висновки до розділу 1.....	21
2. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОРНИХ АГРЕГАТІВ	
2.1 Обґрунтування вибору схеми кріплення плуга до трактора.....	22
2.2. Напрями зниження енергозатрат під час виконання процесу оранки..	27
Висновки до розділу 2.....	31
3.РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОРНИХ МТА	
3.1. Визначення енергоспоживання операції з використанням нелінійних багатоцільових моделей трактора та плуга.....	32
3.2. Результати моделювання процесу оранки.....	36
Висновки до розділу 3.....	40
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	42

ВСТУП

Актуальність теми. Оранка, як одна з найпоширеніших технологічних операцій, визначає якість підготовки ґрунту до сівби, рівень збереження вологи, стан посівного шару та формування умов для розвитку культурних рослин. Проте ефективність оранки значною мірою залежить від конструкційно-технологічних параметрів орних агрегатів, відповідності їх можливостей фізико-механічним властивостям ґрунту та режимам роботи машинно-тракторних агрегатів.

У сучасних умовах зростання вартості паливно-енергетичних ресурсів, інтенсивного використання техніки та необхідності підвищення її продуктивності питання обґрунтування раціональних параметрів плугів і тракторів набуває особливої актуальності. Неправильно підібрані параметри агрегату призводять до перевитрат палива, зниження тягової ефективності, надмірного ущільнення ґрунту, погіршення якості оранки та зменшення врожайності культур. Тому дослідження, спрямовані на теоретичне й практичне обґрунтування оптимальних параметрів орних агрегатів, є своєчасними та необхідними для підвищення енергоефективності аграрного виробництва, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення стабільної якості виконання технологічних процесів.

Мета роботи: підвищення ефективності процесу оранки, шляхом обґрунтування раціональних конструкційно-технологічних і тягово-енергетичних параметрів орних агрегатів.

Завдання дослідження:

- проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку орних агрегатів у системах основного обробітку ґрунту;
- визначити конструкційно-технологічні параметри плугів, що впливають на якість оранки та енерговитрати;
- обґрунтувати раціональні швидкісні та глибинні режими роботи орних агрегатів;

- розробити методику вибору оптимальних параметрів орного агрегату з урахуванням властивостей ґрунту та енергонасиченості трактора.
- оцінити ефективність запропонованих параметрів, їх вплив на якість обробітку ґрунту.

Об'єкт дослідження - орні машинно-тракторні агрегати, що виконують технологічний процес основного обробітку ґрунту.

Предмет дослідження - закономірності формування та оптимізації конструкційно-технологічних і тягово-енергетичних параметрів орних агрегатів, що визначають ефективність виконання основного обробітку ґрунту.

Методи дослідження: Аналіз науково-технічної літератури. Теоретичне моделювання взаємодії робочих органів плуга з ґрунтом для визначення оптимальних конструкційних і технологічних параметрів. Розрахунково-аналітичні методи для визначення оптимальних параметрів та режимів роботи орних агрегатів.

Перелік публікацій автора:

1. Заєць М. Л., Савчук В. Р. Навісні та напівнавісні плуги для агрегування з енергонасиченими тракторами. Зб. праць XI Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир: ЖТФК, 2025. С. 167-170.

2. Заєць М. Л., Савчук В. Р. Обґрунтування параметрів агрегування плуга при силовому аналізі його роботи: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. С. 177-180.

3. Заєць М. Л., Савчук В. Р. Визначення параметрів налаштування плуга при його силовому аналізі. Зб. тез доп. XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" НУБіПУ. Київ. 2025. С. 486-490.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 17 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 43 сторінок комп'ютерного тексту, 29 рисунків та 6 таблиць.

1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ОРНИХ АГРЕГАТИВ У СИСТЕМАХ ОСНОВНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

1.1. Огляд конструктивно-технологічних параметрів роботи полицевих плугів та орних агрегатів

При роботі з високопотужними енергозасобами в Україні нині широко імпортують навісні та напівнавісні плуги іноземного виробництва, зокрема від німецької компанії Lemken, норвезької Kverneland та французьких Kuhn і Gregoire Besson (рис. 1.1,) [1, 2, 3, 4].



а)

б)

Рис. 1.1 Напівнавісний плуг Lemken Diamant 12.

Ці плуги переважно випускаються в оборотному варіанті. Оборотні плуги забезпечують виконання гладкої оранки без формування гребенів і розгінних борозен. На рамі розміщені корпуси правого та лівого обертання, встановлені дзеркально. Під час розвороту на наступний робочий прохід плуг перевертається на протилежний бік, завдяки чому ґрунт відкидається в один і той самий бік [1]. Поворот рами при переході на новий хід забезпечує спеціальний оборотний механізм, який приводиться в дію гідросистемою трактора (рис. 1, б) [1].

У деяких модифікаціях такі плуги обладнані системою регулювання ширини захвату, що здійснюється шляхом зміни кута встановлення основного бруса рами в межах $25 \dots 32^\circ$. [5,6]

Основним недоліком даного виду полицевих машин є те, що наслідками їхнього застосування в ґрунтообробці є руйнування родючої частини ґрунту – відрова та водна ерозія після оранки.

Вітрова ерозія є одним із найнебезпечніших процесів деградації ґрунтів, що призводить до значних екологічних та господарських втрат. Основними наслідками цього явища є втрата цінного верхнього родючого шару ґрунту, пошкодження посівів ґрунтовими частинками, загальне погіршення структури та деградація ґрунтів, а також негативний побічний вплив на довкілля.

Для запобігання вітровій ерозії застосовують комплекс агротехнічних заходів. До найефективніших належить збереження пожнивних решток на поверхні поля, що сприяє утворенню природного захисного шару. Важливе значення має дотримання правильної сівозміни, вибір оптимального міжряддя та напрямку рядків. Значний ефект забезпечує правильне налаштування комбайнів для рівномірного розподілу пожнивних решток. [7].

Додатковими заходами є вирощування покривних культур, які допомагають зберігати вологу та захищають ґрунт від вітрового впливу. Застосування мінімального або нульового обробітку ґрунту також суттєво зменшує ризики руйнування його структури. Ефективним методом протидії ерозії є створення лісосмуг та інших вітрозахисних насаджень, які знижують швидкість вітру та сприяють стабілізації ґрунту.

Але без обертання поверхневого шару ґрунту, важко дотриматись агротехніки вирощування основної маси культур, тому обґрунтування параметрів орних МТА є досить складною задачею. [8].

У процесі обробітку ґрунту можуть виникати різні типи його ущільнення, що негативно впливають на водно-повітряний режим та розвиток рослин. Одним із поширених проявів є поверхнева кірка завтовшки від 10 до 25 мм, яка формується внаслідок ущільнення верхнього шару ґрунту. Вона значно

ускладнює проникнення води та повітря, а також перешкоджає появі дружних сходів культур. [8].

Іншим видом є поверхнєве ущільнення в шарі 200 ... 300 мм. Воно може бути послаблене під впливом обробітку ґрунту, розвитку кореневої системи рослин, циклів заморожування-відтавання, чергування вологих і сухих періодів, а також унаслідок біологічної активності ґрунту. [8].

Особливо небезпечним є формування підплужної підшви — ущільненого шару, що виникає нижче глибини основного обробітку. Це відбувається при постійному виконанні польових робіт на одній і тій самій глибині з року в рік, що призводить до зниження водопроникності та погіршення умов росту коренів(рис. 1.2). [8].

Також поширеним явищем є ущільнення бокових стінок борозни, особливо за важких або надмірно вологих умов під час сівби. Таке ущільнення ускладнює правильне формування кореневої системи та може стримувати розвиток рослин.

Табл. 1.1.

Типи ґрунтів та рекомендовані способи обробітку

Тип ґрунту	Характеристика	Коментарі
Підзолистий	Зазвичай зустрічається у холодних, вологих регіонах. Може бути піщаним із дуже гарним дренажем або таким, що має неглибоке залягання коренів і поганий дренаж. Добре дреновані суглинкові ґрунти можуть бути високопродуктивними за умови внесення вапна та добрив.	Рекомендований традиційний обробіток
Глей	За відсутності осушення — болотистий ґрунт, насичений ґрунтовими водами. Часто трапляється у низинних місцевостях.	Рекомендований традиційний обробіток
Чорнозем	Ґрунт чорного кольору з високим вмістом гумусу (7–15%), високим вмістом фосфорної кислоти, фосфору й амонію. Дуже родючий.	Рекомендований традиційний обробіток
Солонець	Верхній шар завтовшки до 100 см містить понад 15% обмінного натрію та має високий вміст глини.	Рекомендований нульовий обробіток



Рис. 1.2. Типи ґрунтів

Аналіз плугів фірми Джон Дір показує -доступні розміри та конфігурації плугів включають ширину захвату 3810 мм, яка може використовуватися як у борозні, так і поза нею. Моделі пропонуються з різною кількістю корпусів: 5 корпусів, 6 корпусів (5+1) (рис. 1.3.), 7 корпусів (6+1) та 8 корпусів (7+1) (рис. 1.4.). Конструктивно плуги можуть бути напівнавісними або з жорсткою рамою, а також представлені у варіанті поворотного плуга. Особливою перевагою є можливість знімання одного корпусу для регулювання ширини обробітку, за винятком 5-корпусної моделі. [9].



Рис. 1.3. Моделі з різною кількістю корпусів: 5 корпусів, 6 корпусів (5+1)

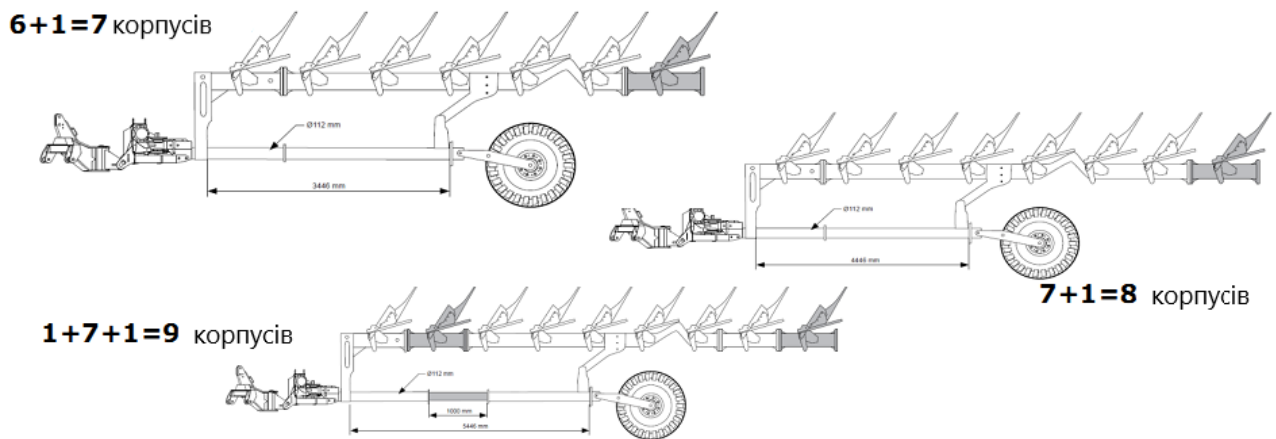


Рис. 1.4. Моделі з різною кількістю корпусів: 7 корпусів (6+1) та 8 корпусів (7+1)

Існують конфігурації плуга, які мають ширину захвату 3810 мм, яку можна використовувати як у борозні, так і поза нею. Плуг пропонується з різною кількістю корпусів: 5 корпусів, 6 корпусів (5+1), 7 корпусів (6+1) та 8 корпусів (7+1). Конструкція може бути напівнавісною або з жорсткою рамою, а також представлена у варіанті поворотного плуга. Крім того, для регулювання ширини обробітку завжди можна зняти один корпус, за винятком 5-корпусної моделі. [8]

Транспортно-опорне колесо плуга виконане великого діаметра (400/70×20), з діаметром 1093 мм та шириною 410 мм (рис. 1.5.). Конструкція забезпечує плавне подолання перешкод і нерівностей рельєфу, зменшує тиск на ґрунт та підтримує стабільну глибину оранки, а також сприяє рівномірному ходу агрегату під час транспортування.

Гідравлічний циліндр опорного колеса оснащений азотним акумулятором, що підвищує плавність руху та знижує динамічне навантаження на трактор і плуг. Така конструкція забезпечує оптимальне розподілення сил у процесі роботи, підвищує стійкість агрегату та покращує умови експлуатації як у польових, так і в транспортних режимах. [8]



Рис. 1.5. Транспортно-опорне колесо плуга оснащено гідроциліндром з азотним акумулятором

Це дозволяє знизити ущільнюючу дію на ґрунт під час виконання роботи та руху по полі. Опорне колесо забезпечує захист від просідання під час транспортування та запобігає контакту між рамою плуга і колесом. Воно завжди залишається в межах габаритних розмірів плуга під час оранки на краях поля, при цьому може бути розташоване далі по тильній частині агрегату. Конструкція сприяє ефективнішому перенесенню ваги на трактор, знижує навантаження на нижні важелі трактора та зменшує можливі перешкоди при використанні автоматичних систем регулювання тягового зусилля. [8]

Передні опорні колеса (рис. 1.6.) призначені для стабілізації плуга під час оранки як у борозні, так і поза нею. Вони направляють агрегат при роботі поза борозною, забезпечують підтримання робочої глибини по всій довжині плуга та дозволяють керувати боковим зміщенням. Використання передніх опорних коліс зменшує поперечне навантаження на нижні важелі навісного пристрою трактора. [8]



Рис. 1.6. Передні опорні колеса

Регулювання першої борозни може виконуватися механічним або гідравлічним способом:

Механічна регулювання – шляхом відкручування болта та встановлення необхідної ширини.

Гідравлічне регулювання – за допомогою гідравлічного циліндра, керованого з кабіни трактора. Гідравлічне регулювання передньої борозни рекомендується при частій зміні тракторів або для демонстраційних робіт (рис.1.7).



Рис. 1.7. Гідравлічне регулювання першої борозни

Передні опорні колеса допомагають оператору підтримувати рух плуга по прямій та забезпечують точну орієнтацію корпусів під час роботи (регулювання плуга 3810 у борозні). [8]

Гідравлічне регулювання першого корпусу є базовим обладнанням плуга. Гідравлічний циліндр автоматично переміщується всередину та назовні під час розвороту плуга. Ця система зберігає низьке положення центра тяжіння агрегату під час виконання розвороту на розворотній смузі, що підвищує стійкість і безпеку роботи. [8]

Плуги моделі 3910 можуть працювати як у борозні, так і поза нею. Конструктивно вони представлені з різною кількістю корпусів (рис. 1.8.): [8]

- 9 корпусів (4+1/3+1),

- 10 корпусів ($5+1/3+1$),
- 11 корпусів ($5+1/3+1+1$),
- 12 корпусів ($8/3+1$),
- 13 корпусів ($8/3+1+1$).

Основні конфігураційні особливості включають: напівнавісну конструкцію, гнучку раму, оборотні корпуси, можливість знімання одного або двох корпусів залежно від технологічних потреб.

Ці варіанти дозволяють адаптувати плуг до різних умов ґрунту та вимог агротехніки, забезпечуючи оптимальну глибину та ширину оранки.

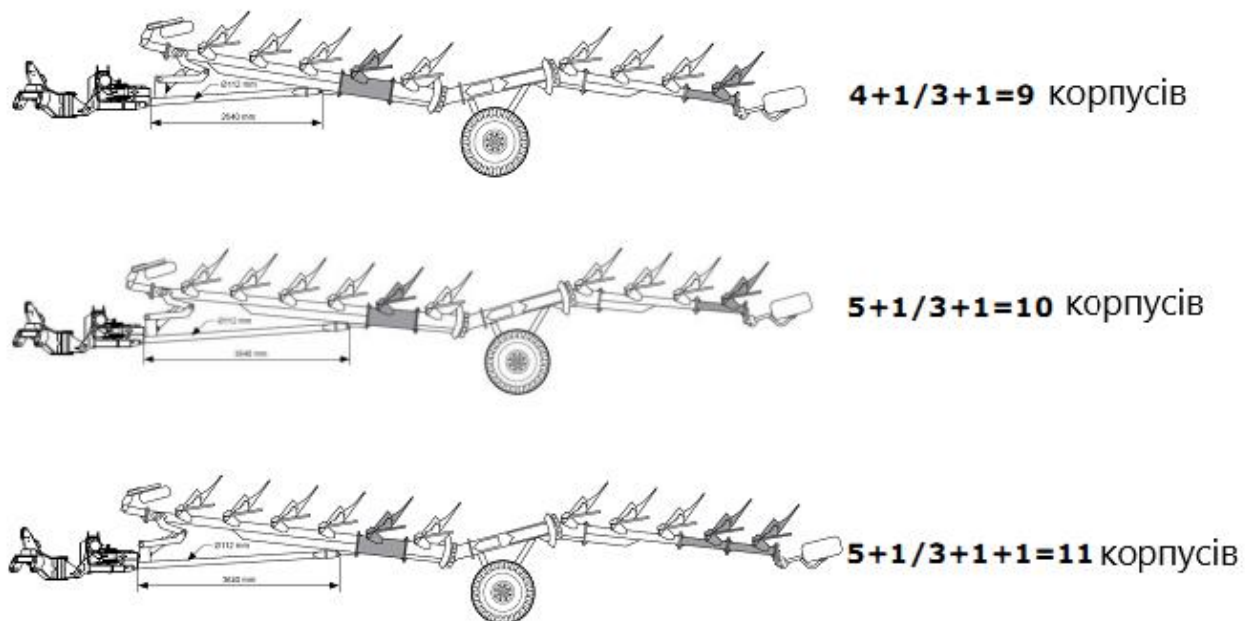


Рис. 1.8. Основні конфігураційні особливості напівпричіпних плугів

Дизайн та розміри гнучкої рами сучасного плуга виготовлена із замкнутих трубчастих елементів, що забезпечує захист від потрапляння пилу всередину та запобігає корозії. Передня частина візка виконана з прямокутних труб розміром 260×180 мм, а за тележкою – з труб 180×180 мм із товщиною стінки 10 мм.

Для конфігурацій $8/3 + 1$ та $8/3 + 1 + 1$ (рис. 1.9.) передбачена додаткова підсилювальна труба розміром 100×100 мм, що підвищує міцність конструкції. Така трубчаста замкнена рама забезпечує високу жорсткість і надійність роботи агрегату навіть за значних навантажень.

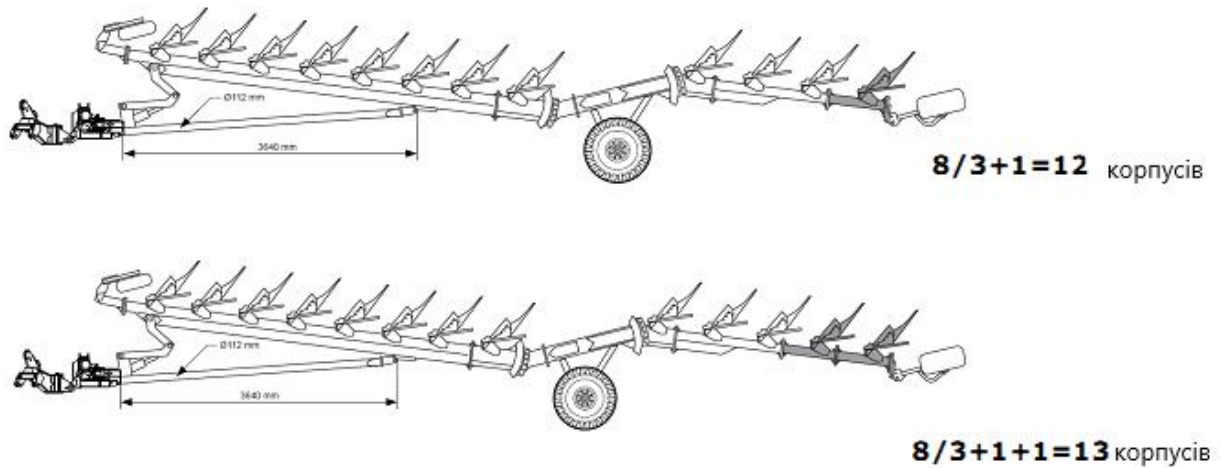


Рис. 1.9. Конфігурація плуга 3910- 8/3 +1 та 8/3 +1 +1

Візок розташований практично в центрі плуга, що забезпечує оптимальне розподілення ваги між трактором та агрегатом. Значна частина навантаження передається на трактор, що сприяє покращенню стійкості та керованості під час роботи. [8]

Опорні колеса візка великого діаметра з параметрами: 400/70×20, діаметром 1093 мм та шириною 413 мм, забезпечують плавний рух агрегату, стійкість при транспортуванні та мінімальний тиск на ґрунт. [8]

Гнучка рама у поєднанні з центрально розташованим візком (рис. 1.10) дозволяє частинам плуга, що знаходяться позаду, точно повторювати контур поля. [8]



Рис. 1.10. Гнучка рама у поєднанні з центрально розташованим візком

Для роботи в складних умовах візок можна зафіксувати, а автоматичне блокування забезпечується на краю поля та у транспортному положенні.

Така конструкція зменшує внутрішні напруження, що діють на всю раму та трактор, сприяє рівномірному розподілу навантажень та забезпечує більш стабільну глибину оранки. [8]

Заднє опорне колесо плуга має розмір **10.0/75×12**, діаметр **680 мм** та ширину **260 мм** (рис. 1.11.). Воно підтримує візок та передні опорні колеса, забезпечуючи стабільну робочу глибину плуга під час оранки та покращує експлуатаційні параметри орного МТА. [8]



Рис. 1.11. Заднє опорне колесо причіпного плуга

1.2. Допоміжне обладнання орних агрегатів

Пара опорних коліс для Quick Coupler (рис. 1.12.). Пара опорних коліс має розмір **10.0/75×12**, діаметр **680 мм** та ширину **260 мм**. Колеса сумісні з категоріями навіски тракторів Cat. III та IV і рекомендовані для використання з гусеничними тракторами. [8]



Рис. 1.12. Пара опорних коліс для Quick Coupler

Вони сприймають навантаження плуга у передній частині, забезпечуючи при цьому роботу гусениць трактора з максимальним контактом із ґрунтом, що підвищує ефективність тягового зусилля та стійкість агрегату. [8]

Причіпний підйомник (рис. 1.13*а*.) застосовується у випадках, коли трактор не оснащений триточковою навісною системою. Підключення здійснюється через дишло до тягового бруса трактора. Підйомник обладнаний триточковою навіскою та гідравлічними гнучкими з'єднаннями для кріплення плуга.

Модель доступна для тракторів із навісною системою CAT IV, при цьому для тракторів з CAT V необхідний конверсійний комплект для сумісності рис. 1.13*б*).



а)

б)

Рис. 1.13. Причіпний підйомник (*а*) та конверсійний комплект для сумісності (*б*)

Зубчасто-рейковий механізм (рис. 1.14.) забезпечує плавний оборот плуга під час розвороту трактора без виникнення мертвої точки. Система дозволяє виконувати реверс, зупинку та продовження обороту у будь-який момент. Навіть під час зупинки механізму оператор може продовжувати керувати опорним колесом, що забезпечує більш гострі та точні розвороти трактора.

Відстань між корпусами плуга складає 100 см, а висота рами – 76 см. Ці параметри перевірені та оптимізовані для забезпечення належного потоку

рослинних решток під час оранки, що підвищує ефективність роботи агрегату та зменшує ризик засмічення.



Рис. 1.14. Зубчасто-рейковий механізм обороту бруса корпусів плуга

1.3. Порівняльна характеристика плугів до орних агрегатів

Порівняння аналогічних машин для орних агрегатів наведено в табл. 1.2., 1.3.

Таблиця 1.2.

Порівняльна характеристика плугів JD 3810, Lemken Diamant 11, Kuhn Manager C та Kverneland RN

Параметр	JD 3810	Lemken Diamant 11	Kuhn Manager C	Kverneland RN
Тип плуга	В борозні	В борозні / поза борозною	В борозні (опція)	В борозні
Тип рами	Жорстка	Жорстка	Жорстка	Гнучка рама / Жорстка
Розміри рами (мм)	180×180	180×180	160×160	180×180 / 200×200
Кліренс під рамою (см)	76	76	80	70 або 80
Міжкорпусна відстань (см)	100	100	100 або 120	102 / 100 або 115
Навісна система трактора	Cat III, IV N	Cat III, IV N	Cat III, III N	Cat III
Оборотний механізм	Зубчасто-рейковий	Зубчасто-рейковий	2 гідравлічних циліндри	2 гідравлічних циліндри
Кількість корпусів	5,6,7,8,9 (5, 5+1, 6+1, 7+1, 1+7+1)	5,6,7,8 (5+1, 6+1, 7+1)	5,6,7,8 (5, 5+1, 6, 6+1, 7, 7+1, 8, 8+1)	5,6,7,8 (3+2, 3+(2+1), (3+1)+(2+1), (3+1+1)+(2+1))

Робоча ширина корпусу (см)	35,40,45,50	35,40,45,50	33,38,44,50	35 або 40
Налаштування ширини захвату	Ручне, 4 кроки	Ручне, 4 кроки	Ручне, 4 кроки	Ручне, 2 кроки
Налаштування першого корпусу	Механічне або гідравлічне	Механічне або гідравлічне	Механічне або гідравлічне	Гідравлічне
Захист від пошкоджень	Зрізний болт	Зрізний болт	Зрізний болт	Зрізний болт (база) або гідравліка (опція)
Тип полив	Плоскі або перові, сталь	Плоскі або перові, сталь	Плоскі або перові, сталь або пластик	Плоскі або перові, сталь або пластик
Ніж	Дисковий або черенковий на останньому корпусі, черенковий на всіх корпусах, діаметр дискового ножа 510 мм	Дисковий або черенковий на останньому корпусі, черенковий на всіх корпусах, діаметр дискового ножа 510 мм	Опціональний дисковий або черенковий, діаметр 500 або 590 мм	Опціональний дисковий або черенковий, діаметр 500 або 600 мм
Передплужник	Опція	Опція	Опція	Опція
Полиця для решток	Опція	Опція	Опція	Опція
Підсилення лемеха	“Plasmabid” (база)	“Plasmabid” (база)	Синтетика	Карбон (опція), спеціально загартована сталь (база)
Подовжувач передньої полиці	Подовжувач переднього відвалу	Подовжувач переднього відвалу	Подовжувач переднього відвалу	Ніж/подовжувач на останньому корпусі, деякі моделі недоступні
Транспортне колесо	Стандарт 400/70*20, діаметр 1093 мм, ширина 413 мм	Стандарт 400/70*20, діаметр 1093 мм, ширина 413 мм	Стандарт 400/55-22.5, діаметр 1020 мм, ширина 400 мм	Візок з 2 колесами 400/60*15.5, діаметр 875 мм, ширина 400 мм; або центр 400/22,5
Підвіска транспортного колеса	Азотний акумулятор (база)	Азотний акумулятор (база)	Азотний акумулятор (опція)	Азотний акумулятор, механічна (опція гідравлічної)

Передні опорні колеса	Немає	База 700×12, діаметр 670 мм, ширина 190 мм	База on-land 11.5/80-15.3, діаметр 845 мм, ширина 290 мм	Опція 500/22.5, діаметр 1150
------------------------------	-------	--	---	---------------------------------

Таблиця 1.3.

Порівняльна характеристика плугів JD 3910, Lemken Diamant 11, Kuhn Manager C та Kverneland RN

Параметр	JD 3910	Lemken Eurotitan	Kuhn Challenger T	Kverneland PW
Тип плуга	В борозні / поза борозною	В борозні / поза борозною	В борозні / поза борозною	В борозні / поза борозною
Тип рами	Гнучка	Гнучка	Гнучка	Гнучка
Розміри рами (мм)	180×260 / 180×180	180×180	220×220	200×250 / 200×200
Кліренс під рамою (см)	76	80	80	70 або 75
Міжкорпусна відстань (см)	100	100	102	100–115
Навісна сиситема трактора	Cat III, IV	Cat III, IV	Cat III	Cat III до 9 корпусів, Cat IV від 10–12 корпусів
Оборотний механізм	Зубчасто-рейковий	2 гідравлічних циліндри	2 гідравлічних циліндри	2 гідравлічних циліндри
Кількість корпусів	9,10,11,12,13 (4+1/3+1, 5+1/3+1, 5+1/3+1, 8/3+1, 8/3+1+1)	9,10,11,12 (6+3, 6+3+1, 7+3, 7+3+1, 8+3, 8+3+1)	7,8,9,10,11,12 (4+3, (4+1)+3, (4+1)+(3+1), (4+1+1)+(3+1), (4+4)+3, (4+4)+(3+1))	7–12 (4+3, 5+3, 6+3, 6+4, 8+4), без 11 нижнього; 13 та 14 – опціонально
Робоча ширина корпусу (см)	35,40,45,50	33,38,44,50	35,40,45	35,40,45,50
Налаштування ширини захвату	Ручне, 4 кроки	Ручне, 4 кроки	Ручне, 3 кроки	Ручне, 4 кроки
Налаштування першого корпусу	Гідравлічне (база)	Гідравлічне (опція)	Гідравлічне (база)	Механічне або гідравлічне
Захист від пошкоджень	Зрізний болт (база)	Зрізний болт (база)	Зрізний болт (база)	Зрізний болт (база)

Висновки до розділу 1.

Проведено аналіз сучасних конструктивно-технологічних параметрів плугів та орних агрегатів, що використовуються в Україні, зокрема напівнавісних і навісних моделей провідних іноземних виробників.

Встановлено, що оборотні плуги забезпечують рівномірну оранку без формування гребнів та розгінних борозен, а системи регулювання ширини захвату і опорні механізми підвищують стабільність роботи агрегату.

Виявлено негативний вплив традиційного обробітку ґрунту на структуру ґрунту, зокрема ерозію, ущільнення та формування підплужної підшви, що потребує застосування комплексних агротехнічних заходів.

Використання допоміжного обладнання (опорні колеса, підйомники, механізми обороту корпусів) дозволяє знизити динамічне навантаження на агрегат, оптимізувати розподіл ваги та підтримувати необхідну глибину обробітку.

Сучасні конструктивні рішення плугів забезпечують поєднання ефективного обробітку ґрунту з мінімізацією негативного впливу на його структуру, що є важливим для підвищення продуктивності та екологічної безпеки землеробства.

2. ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОРНИХ АГРЕГАТІВ

2.1 Обґрунтування вибору схеми кріплення плуга до трактора

Для оранки «в борозні» необхідно дотримуватися наступних параметрів:

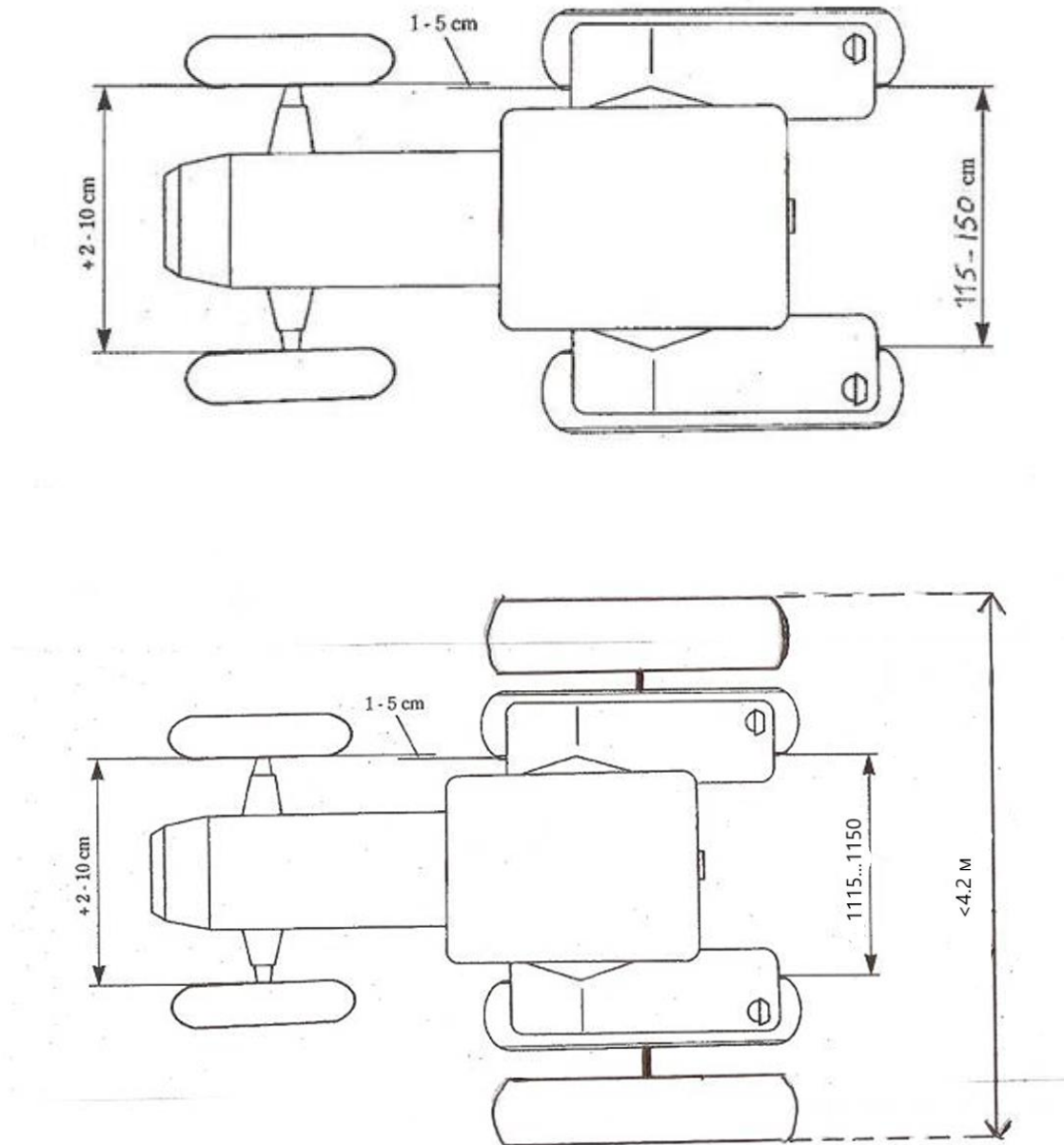


Рис. 2.1. Схема встановлення ширини колії трактора під оборотні плуги

Плуг до енегетичного засобу встановлюють двоточною (рис. 2.2 (а)) або триточною (рис. 2.2(б)) схемою кріплення оборотного плуга до трактора:

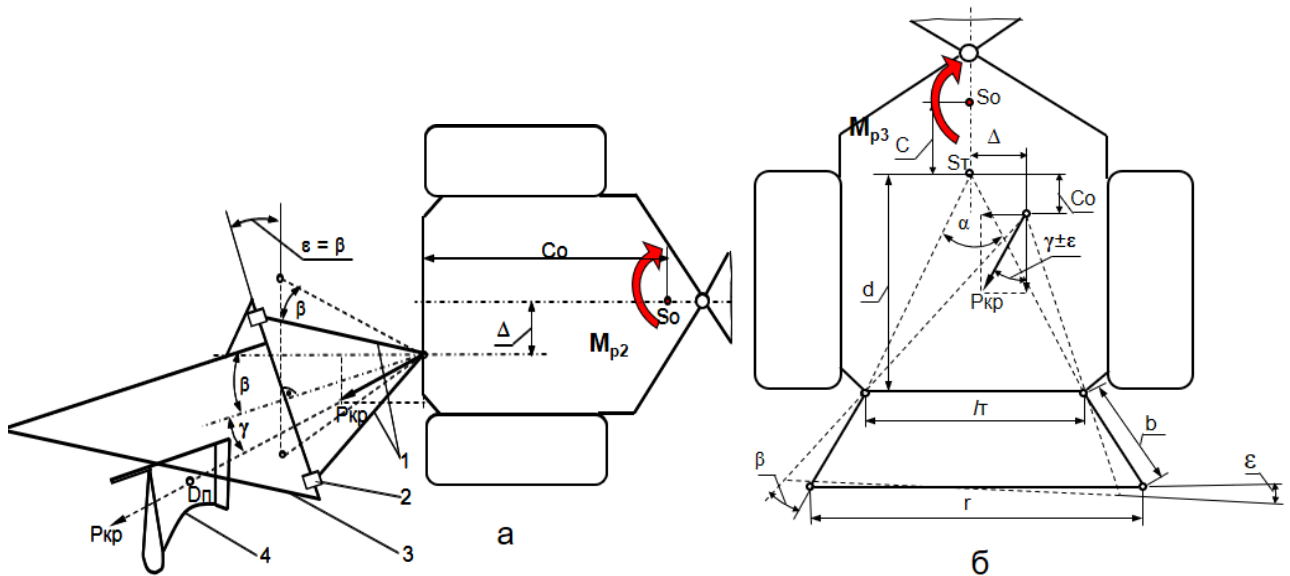


Рис. 2.2. Розрахункова схема налаштування начіпного механізму трактора
1 - поздовжні тяги начіпного механізму трактора; 2 - з'єднувальна навіска плуга; 3 - брус жорсткості рами; 4 – умовний середній корпус.

Схема налаштування задньої навісної системи трактора визначається такими факторами:

- забезпечення достатньої кутового преміщення плуга відносно лінії тяги трактора;
- мінімізація розворотного моменту M_T ;
- необхідна значення величини та напрямку поперечного відхилення плуга відносно повздовжньої осі трактора.

Умова, що забезпечує достатнє кутове преміщення плуга відносно лінії тяги трактора визначається з виразу:[12]

$$\alpha = 2 \arccos[d \cdot (r - l_T) / (l_T \cdot b)] \geq 22 \text{ град}, \quad (2.1)$$

де d – заглиблювальний момент та відстань від осі нижніх тяг до миттєвого центру обертання ($S_{пл.}$) навісної системи трактора; b – довжина поздовжньо тяги навіски.

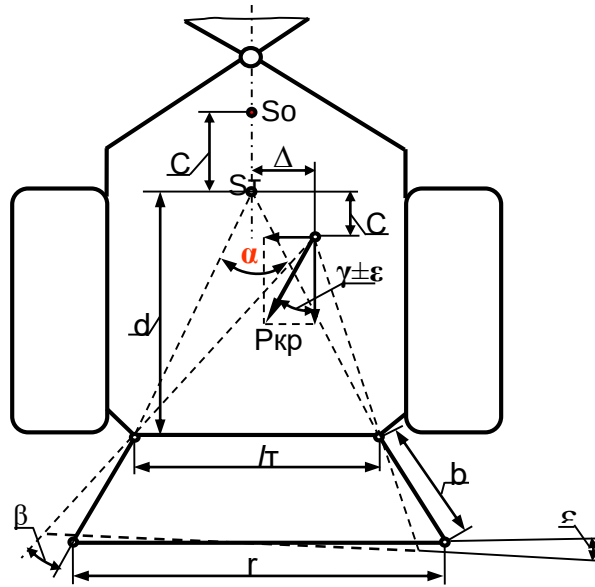


Рис. 2.2. Розрахункова схема плуга МЦО відносно навіски трактора

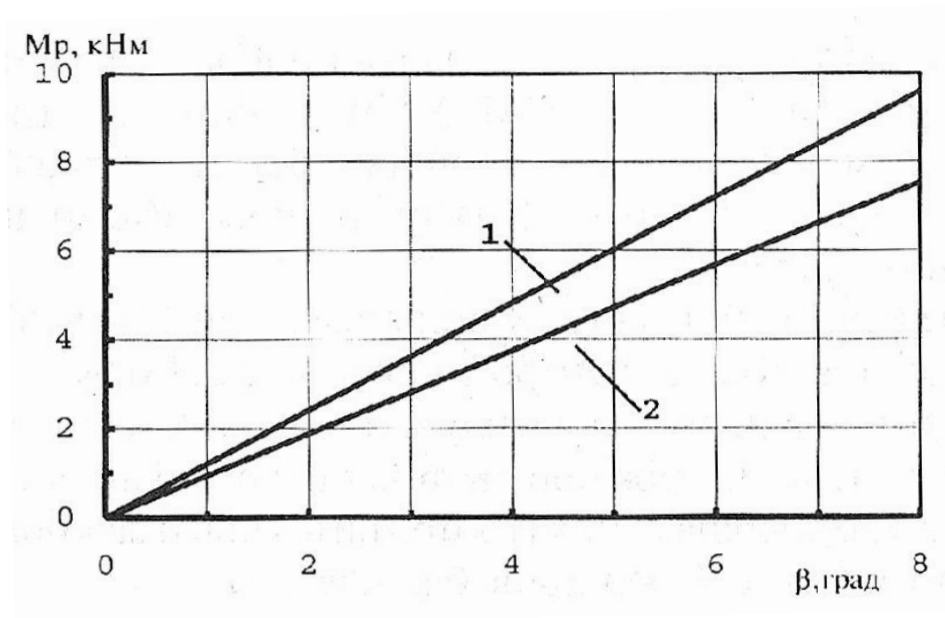


Рис. 2.3. Графічна залежність величини поворотного моменту M_r від від величини кута β за дво точкового (1) та три точкового (2) налагодження навіски енергетичного засобу

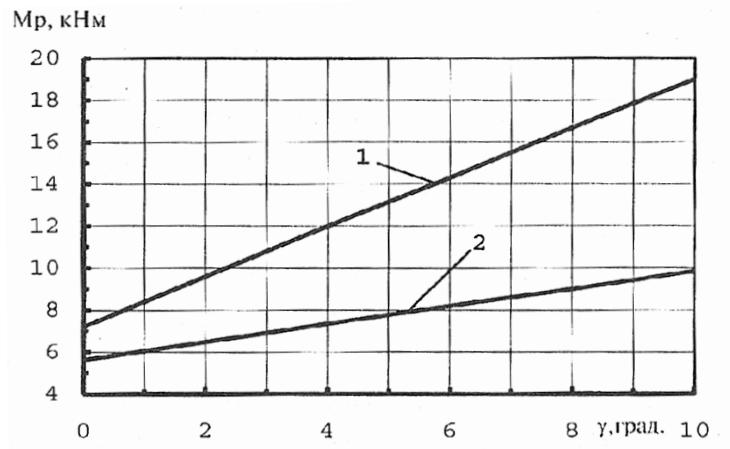


Рис. 2.4. Графічна залежність величини поворотного моменту M_r від величини кута γ за дво точкового (1) та три точкового (2) налагодження навіски енергетичного засобу

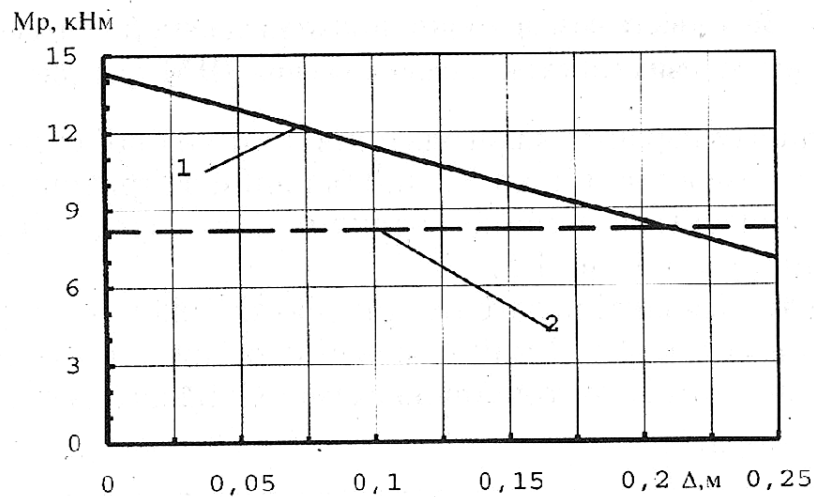


Рис. 2.5. Графічна залежність величини поворотного моменту M_r від величини кута Δ за дво точкового (1) та три точкового (2) налагодження навіски енергетичного засобу

Аналізуючи отримані графічні залежності (рис. 2.3.,2.4.,2.5.) можна зробити висновок, що при умові, коли "центр ваги" трактора не збігається з "МЦО" навіски, дія обертового моменту на трактор від плуга, приєднаного за триточною схемою, є меншою порівняно з двоточковим налаштуванням тяг навіски. Тому раціонально налаштувати триточкову схему навішування плуга.

Якщо фактична колія трактора (B_{ϕ}) перевищує потрібну (B_T), то плуг встановлюють несиметрично — із певним поперечним зміщенням праворуч (ексцентриситетом). Причому величина цього зміщення повинна бути пропорційною до різниці між фактичною та бажаною шириною колії трактора.

Зміщення можна визначити:

$$e = B_{\phi} - B_T / 2, \quad (2.2)$$

де

$$\begin{aligned} B_T &= b_k \cdot (n+1) - 2A - b \\ B'_T &= b_k (n+1) + b, \end{aligned} \quad (2.3)$$

де B_T , B'_T - ширина колії трактора при русі рушіїв повз борозною та у борозні;

b_k – ширина захвату корпусу плуга;

n – кількість корпусів в плузі;

A – відстань від стінки борозни до зовнішньої краю рушія;

b – ширина шини колеса трактора.

Відповідно до механічних властивостей ґрунту та умові стійкого руху агрегату, значення відстані A може змінюватися в межах **15...35 см**. Якщо ця відстань більша, на практиці ускладнюється процес утримання механізатором краю борозни попереднього проходу, що спричиняє підвищення нерівномірності ширини захвату агрегату. Натомість за надто малого значення A з'являється ризик зісковзування правих рушіїв енергетичного засобу в борозну, що негативно впливає на якість виконання технологічної операції.

Якщо застосовується триточкова схеми встановлення плуга, то правостороннє зміщення машини зумовлює створення бокової складової сили тяги T' (T_{1y}). Під час руху орного МТА, ця складова створює додаткове

навантаження на польові дошки, що збільшує силу їх тертя об стінку борозни й, відповідно, підвищує тяговий опір плуга.

За симетричного приєднання плуга його центр опору (т. D₀) розташований симетрично центру мас трактора. У такому випадку сила T_{1y} діє з мінімальним значенням.

Якщо ж центр рівнодіючої опору плуга зміщений ліворуч від поздовжньої осі симетрії трактора (т. D₂), то бокова складова T_{2y} сили T₂ чинить меншу дію, що знижує навантаження на польові дошки корпусу плуга. та, призводить до зменшення сумарного опору орного агрегату.

2.2. Напрями зниження енергозатрат під час виконання процесу оранки

За результатами аналізу рівняння, що визначає поперечне переміщення плугів в агрегаті з трактором

$$e_n = \frac{[B_d + 2A + b - b_k(n+1)]}{2}, \quad (2.4)$$

де

e_n - величина поперечного зміщення плуга, у якій враховуються фактична колія енергетичного засобу (B_d), м

A - подвоєна відстань від борозни до зовнішнього краю рушія, м

(b) і $b_k(n+1)$ - ширина рушія та сумарна конструктивна ширина захвату корпусів плуга, м.

Якщо з якихось причин симетрично приєднати плуг до навіски трактора не вдається, то необхідно виконати правостороннє зміщення насамперед шляхом перестановки по навісному механізму тяг трактора разом із зчіпним пристроєм (при двоточковому з'єднанні), а лише у разі недостатності цього переміщення — відносно зчіпного пристрою плуга.

Потрібно переконатися, що обидва важелі навіски та гвинти відрегульовані однаково рис. 2.6.

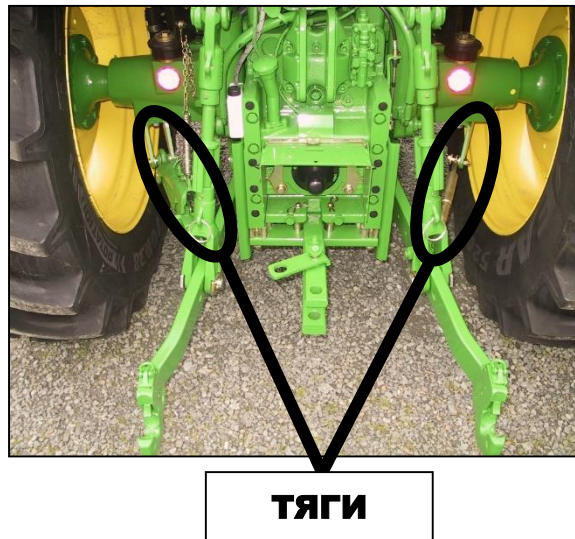


Рис. 2.6. Механізм регулювання вертикальних тяг-розкосів

Для начіпних плугів тяги навіски повинні бути вільними, а для напівначіпних – їх потрібно заблокувати.

Для оборотних плугів, як начіпних так і напівпричіпних необхідно гвинти-розкосів регулювати максимально короткими, щоб унеможливити блокування зміни положення лівих і правих корпусів плуга, та створити достатній простір для обертання механізму з різними категоріями навісок тракторів (рис. 2.7)

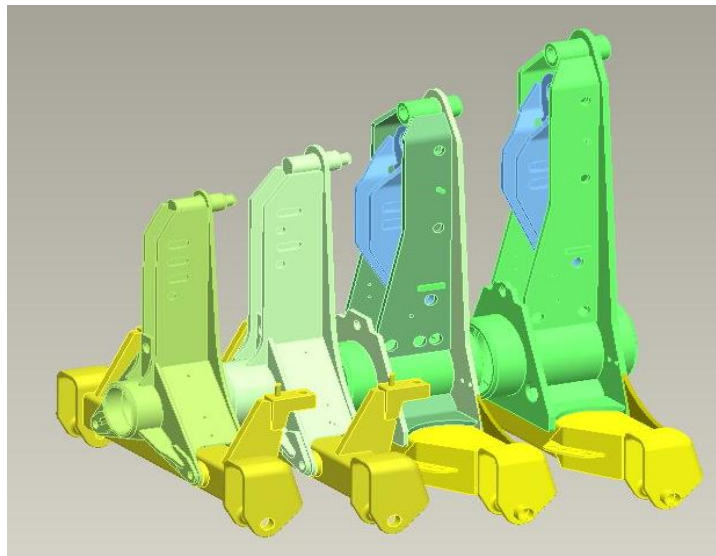


Рис. 2.7. Категорії зчіпних пристроїв плугів

Регулювання третьої точки слід виконувати після зчеплення плуга з трактором. Також необхідно перевірити її перед зчепленням, щоб у разі потреби

відкрутити та змастити різьбу. Перевірити надійність кріплення траверси на важелях навіски трактора.

Потрібно переконатися, що на обох гвинтах третьої точки достатня довжина різьби (6) (рис. 2.8.) у центральних гайках, щоб їх можна було регулювати без ризику вирвати.

Перевірити, щоб обидва гвинти на кінцях були відрегульовані однаково: Видимі ділянки різьби (6) повинні мати однакову довжину ($Z = T$). Таким чином, максимально закрутивши, отримаємо найкоротшу третю точку, а навпаки – відкрутивши, найдовшу.

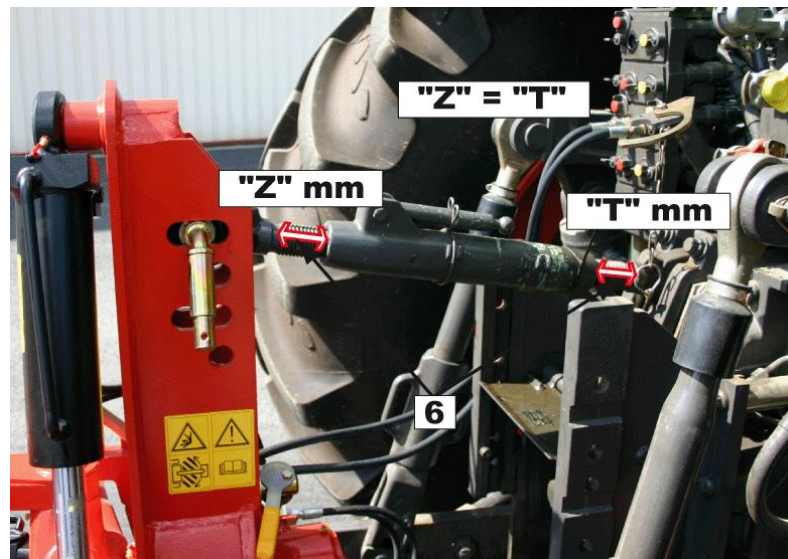


Рис. 2.8. Регулювання центральної тяги навіски трактора

Гвинт 1 (рис. 2.9) призначений для регулювання захвату першого корпусу. Якщо після проходу залишається борозна, потрібно збільшити захват корпусу; якщо утворюється гребінь – зменшити його, змінюючи довжину тяги.

Гвинт 2 (рис. 2.9) також використовується для вирівнювання кута плуга. Плуг повинен рухатися по одній осі з трактором. Якщо плуг тягне вліво або вправо, необхідно подовжити або вкоротити тягу.

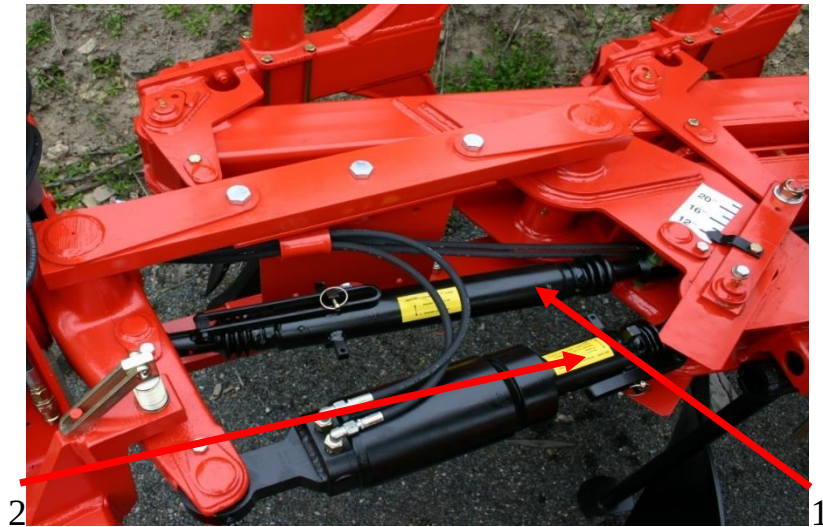


Рис. 2.9. Навісний плуг – регулювання ширини захвату першого корпусу
1 – гвинт регулювання першого корпусу; 2 – лінії тяги трактора.

Для регулювання плуг необхідно перевести в транспортне положення. Потрібно відкрутити кришку 2 та встановити розташовану під нею вісь зміщення так, щоб вісь перебувала посередині ходу гвинтом 1 (рис.2.10). Подальше налаштування слід виконувати в полі, виходячи з результату перекриття.



Рис. 2.10. Напівначіпний плуг – регулювання першого корпусу
1 – гвинт регулювання першого корпусу; 2 – кришка.

Під час розворотів плуг повинен перебувати в транспортному положенні, щоб долото не пошкодило шину колеса трактора (для напівначіпних плугів). При транспортуванні плуга дорогами його потрібно опускати якомога нижче, але не доводячи гідроциліндр до упору, щоб він міг вільно амортизувати.

Висновки до розділу 2.

Проведено обґрунтування вибору схеми кріплення плуга до трактора. Аналіз графічних залежностей поворотного моменту показав, що при відсутності збігу центру ваги трактора та МЦО навіски триточкова схема кріплення є більш раціональною порівняно з двоточною, оскільки зменшує обертальний момент, що діє на трактор, та підвищує стійкість роботи агрегату.

Встановлено, що у разі перевищення фактичної ширини колії трактора над необхідною $> 4,2$ м плуг слід встановлювати несиметрично з певним поперечним зміщенням праворуч (ексцентриситетом), пропорційним до різниці між фактичною та бажаною шириною колії. Це забезпечує зменшення бокового навантаження на польові дошки плуга та зниження сумарного опору агрегату під час руху.

Визначено правильне положення регулювання вертикальних тяг-розкосів навіски: для начіпних плугів тяги повинні залишатися вільними, а для напівначіпних – заблокованими, що забезпечує стабільність корпусів плуга та ефективне обертання механізму при роботі з різними категоріями тракторів.

Рекомендовано виконувати регулювання третьої точки після зчеплення плуга з трактором, перевіряти довжину різьби в центральних гайках та забезпечувати однакову регульовальну довжину обох кінцевих гвинтів для запобігання нерівномірності захвату та порушення центру руху.

Наголошено на необхідності регулювання захвату першого корпусу та кута плуга за допомогою відповідних гвинтів, що дозволяє забезпечити рух агрегату по одній осі з трактором та уникнути утворення борозни або гребня.

Загалом, дотримання конструктивно-технологічних параметрів та правильне регулювання плуга сприяє зниженню енергозатрат, підвищенню точності оранки та збереженню якості обробітку ґрунту.

3.РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОРНИХ МТА

3.1. Визначення енергоспоживання операції з використанням нелінійних багатоцільових моделей трактора та плуга

Важливим елементом «Сільського господарства 4.0» є платформи віртуального моделювання та цифрові двійники, які широко використовуються для створення цифрового середовища техпроцесів з метою швидкого та зворотного тестування сільськогосподарських операцій і навчання операторів. Симулятори можуть бути реалізовані у настільному, статичному та динамічному варіантах.

Оранка є найстарішою та найпоширенішою операцією первинного обробітку ґрунту, що застосовується для перевертання ґрунту та рівномірного розподілу поживних речовин перед сівбою культур. Оранка є високовитратною за енергією та тривалістю операцією, яку можна оптимізувати для досягнення сучасної мети сільського господарства — зменшення впливу на навколишнє середовище. Багато досліджень у літературі зосереджуються на геометрії плуга, часто із застосуванням інструментів моделювання, як, наприклад, у роботах (Jeshvaghani et al., 2013) та (Saunders, 2002). [15, 16]

Форма корпусного плуга визначається трьома кутами, необхідними для розрізання, підйому та перевертання шару ґрунту. Корпусні плуги часто є оборотними та можуть обертатися залежно від сторони оранки; зазвичай вони встановлюються на трактор через триточкову навіску, створюючи жорстке з'єднання у разі наявності від 1 до 4 борозен. Інакше вони оснащуються одним або кількома регульовальними колесами глибини, що робить їх напівнавісними або причіпними плугами.

Для розроблення симулятора потрібна коректна модель, яка відтворюватиме необхідні аспекти. Стандарт ASABE D497.7 MAR2011 [14]

пропонує дані та апроксимаційні функції для оцінювання багатьох показників потужності й силових потреб сільськогосподарських знарядь, зокрема й оранки.

Модель враховувала сили тертя, різання та інерційні сили, що виникають на корпусі плуга внаслідок взаємодії з ґрунтом, і формувала систему рівнянь, залежних від геометрії плуга та структури ґрунту. У моделі тягова сила опору має квадратичну залежність як від швидкості, так і від глибини. На рис. 3.1. показано зміну тягового опору під час оранки залежно від швидкості трактора та глибини оранки згідно з моделлю для трьох рівнів твердості ґрунту.

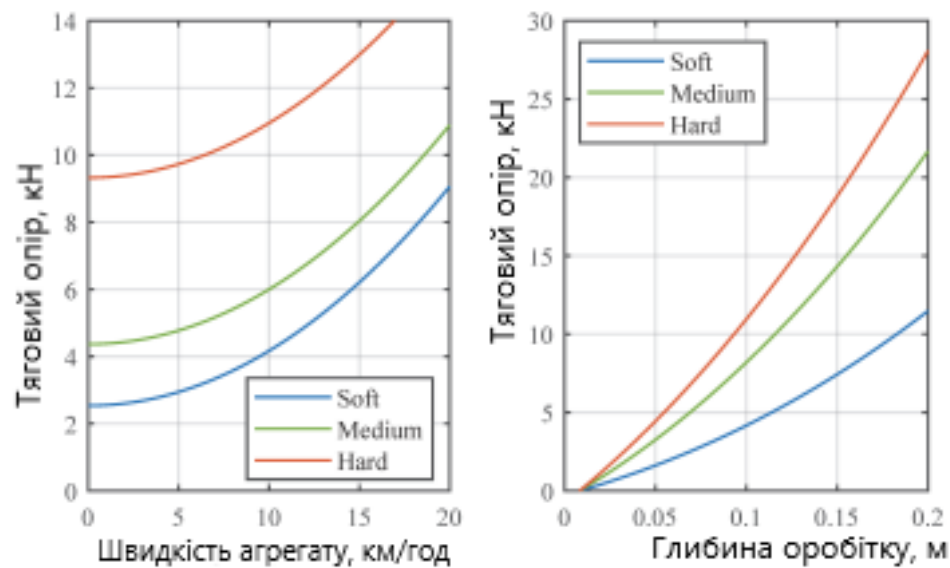


Рис. 3.1. Зміна тягового опору під час оранки залежно від швидкості трактора та глибини оранки

Щодо оцінювання бічних і вертикальних сил, їх зазвичай вважають пропорційними тязі плуга відповідно до таких коефіцієнтів (рівн. 3.1):

$$F_v \approx k_v \cdot F_d, \quad F_l \approx k_l \cdot F_d \quad (3.1)$$

Вертикальна сила зумовлює нахил тягового зусилля у вертикальній площині, збільшуючи навантаження на заднє колесо трактора. Бічна сила (рівн. 3.1) забезпечує кращу стійкість під час оранки «в борозні» і спрямована у бік, протилежний напрямку зсуву ґрунту плугом; вона змінює напрям залежно від того, в який бік повернуто плуг.

Тягова потужність знаряддя, $N_{\text{ПЛ}}$, є основною складовою витрати палива; однак інші параметри зі сторони трактора також впливають на споживання пального. Серед них найбільш значущими є опір кочення шин ($N_{\text{Ш}}$), умови буксування (N_{δ}) та втрата потужності двигуна внутрішнього згоряння ($N_{\text{в}}$). Тоді загальна потужність може бути записана у вигляді:

$$N_{\text{заг}} = N_{\text{ПЛ}} + N_{\text{Ш}} + N_{\delta} + N_{\text{в}}, \quad (3.2)$$

Потужність, що витрачається на опір кочення $R_{\text{Ш}}$, пов'язана з деформацією шини та її заглибленням у ґрунт, тому коректне моделювання взаємодії «шина–ґрунт» є важливим.

Сила опору кочення визначається як:

$$N_{\text{Ш}} = \sum M_{yi} \omega_i \quad (3.3)$$

де M_{yi} - момент опору кочення i -го колеса, нм

ω_i - кутова швидкість маточини колеса, рад/с.

Втрата потужності через буксування шин N_{δ} також є важливим, оскільки, якщо F_{xi} — це повздовжня сила, створювана i -ю шиною, тоді потужність, затрачена силами контакту шини з опорною поверхнею, визначається як:

$$N_{\delta} = \sum F_{xi} V_{sxi} \quad (3.4)$$

де F_{xi} - повздовжня сила, що розвивається i -ю шиною, Н

V_{sxi} - швидкість ковзання у зоні контакту шини з ґрунтом, яка визначається як різниця між периферійною швидкістю колеса та швидкістю руху трактора, м/с.

Ефективність двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), яка залежить від крутного моменту двигуна $M_{\text{кр}}$ та частоти обертання вала двигуна ω , визначає, чи споживатиме двигун більше чи менше потужності залежно від робочої точки на графіку ефективності двигуна. Втрата потужності ДВЗ визначається як:

$$N_{\text{в}} = (1 - \eta(M_{\text{кр}} \omega)) N \quad (3.5)$$

Усі складові мають нелінійний характер; тому важко прямо оцінити вплив окремого параметра на витрату палива.

Сили контакту шин трактора моделюються за допомогою MF-Tyre 5.2, де шини попередньо охарактеризовані експериментальними даними. Коефіцієнти опору кочення розраховані відповідно до стандарту ASAE D497.7, а масштабні коефіцієнти налаштовані для моделювання чотирьох різних взаємодій «шина–грунт»: твердий, середній і м'який ґрунт. Приклад тягових сил наведено на рис. 3.2, де показано повздовжні контактні сили залежно від пробуксовування колеса для м'якого та твердого ґрунту.

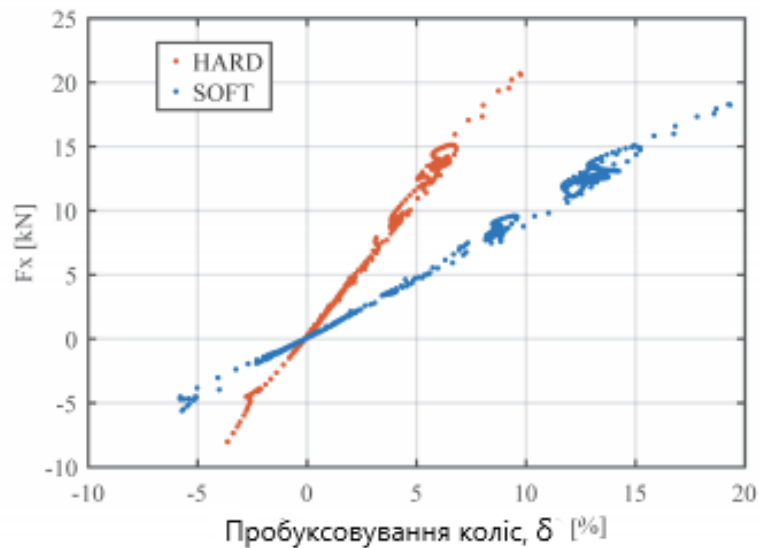


Рис. 3.2. Повздовжні сили шин трактора залежно від пробуксовування коліс для двох типів твердості ґрунту

Модель трактора інтегрована з моделлю плуга для виконання польових операцій з обробітку ґрунту, прогножуючи сили ґрунту в реальному часі та обчислюючи корисну інформацію, таку як оброблена площа (га), час виконання операції та енергія, необхідна для оранки. Маневри піднятого плуга, такі як підйом та поворот знаряддя, можуть контролюватися користувачем і тестуватися під час руху по дорозі для вивчення динаміки транспортного засобу з жорстко встановленим консольним кронштейном, що моделює інерцію знаряддя.

Модель плуга складається з набору рівнянь, що реалізують модель для розрахунку сил взаємодії «грунт–плуг» на основі еталонної геометрії, наведеної на рис. 3.3. Сили реакції поверхонь плуга, врівноважуються силами з'єднання з трактором через триточкову систему (ТСН), які передаються в модель трактора для визначення сил опору руху.

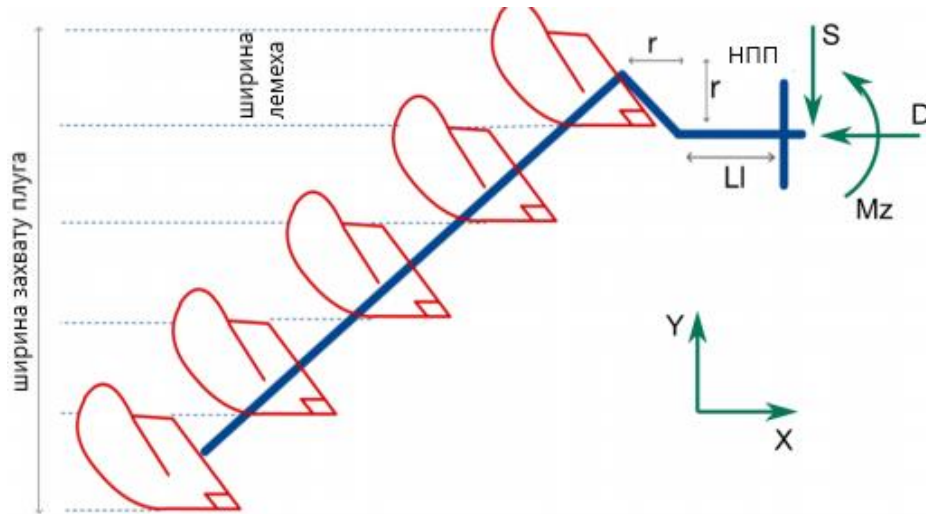


Рис. 3.3. Схема сил та моментів, що передаються тракторам моделі плуга, реалізованої в симуляторі реального часу

3.2. Результати моделювання процесу оранки

Що стосується властивостей ґрунту, було змодельовано три різні рівні твердості ґрунту. У табл. 3.1. наведено параметри ґрунту, які використовувалися для розрахунку тягового опору плуга відповідно до моделі. Для представлення різних ґрунтів змінювалися коефіцієнти зчеплення та напруження зсуву ґрунту. Значення взято з (Das, 2002).[17]

Таблиця 3.1.

Параметри ґрунту, використані в моделюванні для відображення трьох рівнів опору ґрунту під час оранки[17]

Тип ґрунту	М'який ґрунт	Середній ґрунт	Твердий ґрунт
Об'ємна вага (кН/м ³)	15	15	15
Зчеплення (кН/м ²)	8	20	32
Кут опору зсуву (°)	12	16	20
Кут тертя ґрунт–метал (°)	24	24	24

Модель також враховує положення трактора під час оранки «в борозні», як показано на рис. 3.4. У цій ситуації два колеса трактора знаходяться в борозні, тобто на раніше обробленому ґрунті, а колесо з іншого боку — на необробленому ґрунті. Це призводить до руху трактора по прямій з значним кутом нахилу та відповідними кутами нахилу коліс. Ці кути нахилу створюють бічні контактні сили на шинах, через що оператору потрібно скеровувати, щоб підтримувати пряму траєкторію.

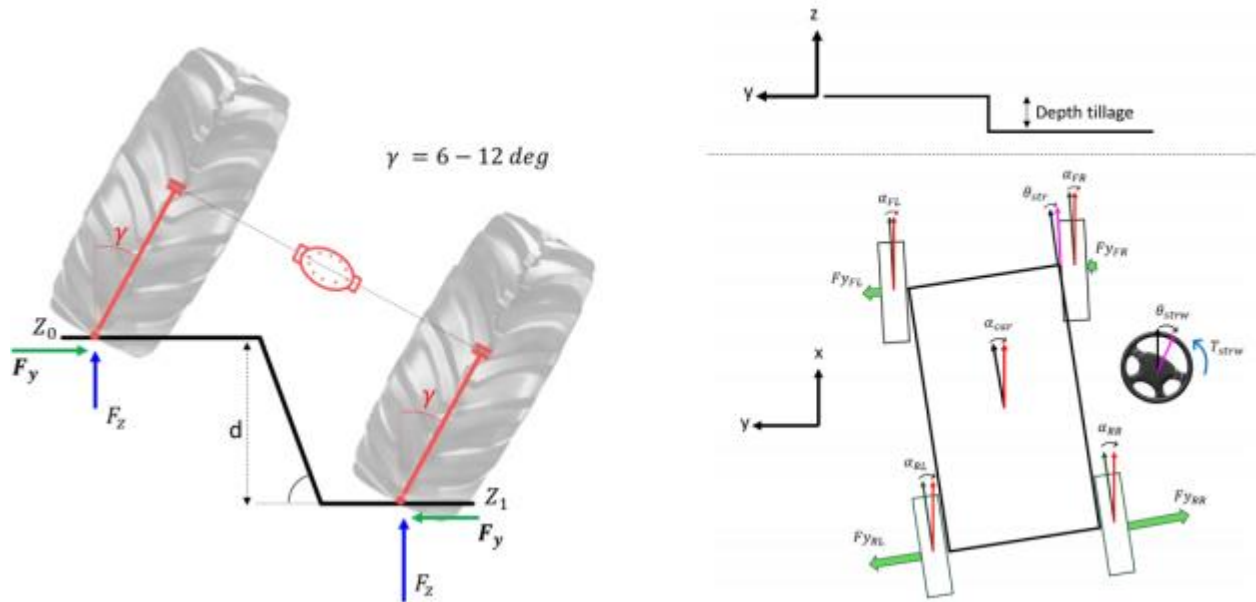


Рис. 3.4. Положення трактора під час оранки «в борозні»

Ліворуч — вид трактора ззаду; праворуч — вид зверху. Виділено сили контакту шин, кути пробуксовування та кут повороту керма, необхідний для підтримання прямолінійної траєкторії.

На рис. 3.5 наведено скріншот симульованої операції оранки, виконаної в симуляторі реального часу, який показує величину кута повороту керма, необхідного оператору для підтримання прямолінійної траєкторії.



Рис. 3.5. Інтерфейс користувача симулятора AgriSI© у реальному часі

Відображає операцію оранки «в борозні», при якій оператору потрібно керувати, щоб підтримувати задану траєкторію.

Було проведено дослідження для виконання аналізу чутливості щодо ключових параметрів процесу оранки (швидкість, тип ґрунту, глибина, навантаження та кількість борозен), що дало повне уявлення про процес обробітку ґрунту. Найважливіші параметри, наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

Параметри та результати всіх змодельованих операцій

№	Операція	Швидкість (км/год)	Глибина (м)	Борозен	Час (хв/га)	Загальна енергія (кВт·год/га)	Енергія оранки (кВт·год/га)	Енергія шин (кВт·год/га)	Частка оранки від загальної енергії (%)
1	Низька швидкість	5	0,2	5	40	25,73	11,06	15,51	60,28
2	Висока швидкість	10	0,2	5	20	38,95	15,39	25,28	64,92
3	М'який ґрунт	5	0,2	5	-	25,57	13,46	12,77	49,93
4	Середній ґрунт	5	0,2	5	-	35,03	15,05	21,12	60,31
5	Твердий ґрунт	5	0,2	5	-	44,28	16,70	29,25	66,07
6	Мала глибина	8	0,2	3	-	18,10	8,12	10,25	56,67
7	Велика глибина	8	0,4	3	-	40,17	17,2	25,02	62,29
8	Менше борозен	7	0,2	3	57,28	45,80	19,95	26,84	57,28
9	Більше борозен	7	0,2	6	29,01	41,38	16,15	27,04	29,01

Випробування проводилися з використанням симулятора версії SIL2 на тракторі John Deere 6250R (4WD - 210 кВт), оснащеному оборотним лемішно-полицевим плугом Kverneland LS з можливістю регулювання кількості корпусів від 3 до 6 (за замовчуванням 5).

Аналіз чутливості проводився шляхом поетапної зміни одного з наступних параметрів:

Швидкість руху трактора від 5 до 10 км/год

Твердість ґрунту: м'який, середній та твердий

Глибина оранки: 20 та 40 см

Кількість корпусів: 3 та 6 (за замовчуванням 5)

Розглянуті вихідні показники включають оброблену площу, час, необхідний для виконання операції, енергоспоживання та інші. Загальна енергія визначається як інтеграл від часу від потужності двигуна (добуток крутного моменту та швидкості обертання двигуна), енергія оранки, як інтеграл від часу від тягової сили, помноженої на швидкість оранки, а втрати шин враховують опір коченню та повздовжні й бічні втрати через пробуксовування.

Втрати енергії розподіляються між силами реакцій, які виникають при оранці та силами контакту шин рушів, на які впливають реакції опору плуга.

Таблиця 3.3.

Результати моделювання операції оранки при двох різних швидкостях для м'якого ґрунту, глибина 20 см, плуг на 5 корпусів

Показник	Одиниця	5 км/год	10 км/год
Швидкість оранки	км/год	5	10
Оброблена площа	га (10^4 м ²)	0,157	0,157
Час на гектар	хв/га	40	20
Загальна енергія на гектар	кВт·год/га	25,73	38,95
Енергія оранки на гектар	кВт·год/га	15,51	25,28
Енергія шин на гектар	кВт·год/га	11,06	15,39
Частка оранки від загальної енергії	%	60,28	64,92

Висновки до розділу 3.

Дослідження роботи орного агрегату показують результати моделювання операції оранки при двох різних швидкостях (5 та 10 км/год) на м'якому ґрунті з плугом на п'ять корпусів. Загальний робочий час на гектар, звичайно, безпосередньо залежить від швидкості. При вищих швидкостях споживання енергії також зростає, як і очікувалося. Нетривіальним є те, що загальні затрати енергії на гектар також залежить від швидкості, але нелінійно: час роботи зменшується вдвічі при подвоєнні швидкості, тоді як загальна витрата енергії зростає лише приблизно на 50%.

Визначено затрати енергії приводу рушіїв і процесу оранки, відсоток енергії, витраченої на оранку, більший при вищій швидкості, тоді як енергія, приводу, менша.

Встановлено, що структура ґрунту відіграє значну роль на результат оранки, оскільки вона впливає як на втрати енергії через шини, так і на енергію оранки. Табл. 3.3 наводить результати моделювання для операції оранки при швидкості 5 км/год і трьох різних рівнях твердості ґрунту з плугом на п'ять борозен. Наведено приблизні значення тягової сили, щоб показати різницю в опорі оранки для трьох розглянутих типів ґрунту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Сучасні плуги, зокрема напівнавісні та навісні моделі провідних виробників, забезпечують регулювання ширини захвату та опорні механізми підвищують стабільність агрегату та зменшують динамічні навантаження під час роботи.
2. Раціональне кріплення плуга до трактора є більш ефективною порівняно з двоточною при відсутності збігу центрів ваги, оскільки зменшує обертальний момент на трактор і підвищує стабільність роботи агрегату. При перевищенні фактичної ширини колії над необхідною $> 4,2$ м рекомендується несиметричне встановлення плуга з поперечним зміщенням для зменшення бокового навантаження та сумарного опору агрегату.
3. Встановлено оптимальні положення вертикальних тяг-розкосів та регулювальних гвинтів для забезпечення стабільності корпусів, рівномірності захвату та руху агрегату по одній осі з трактором. Це сприяє зниженню енергозатрат, підвищенню точності оранки та якості обробітку ґрунту.
4. Моделювання показало, що загальний робочий час на гектар залежить від швидкості руху плуга. При подвоєнні швидкості час роботи зменшується вдвічі, тоді як загальна енергія на гектар зростає лише на 50%. Витрати енергії на привід руху зменшуються, а частка енергії, витраченої безпосередньо на оранку, зростає. Структура ґрунту суттєво впливає на енергозатрати та опір під час обробітку.
5. Поєднання сучасних конструктивних рішень плугів, правильного кріплення та регулювання агрегатів дозволяє досягти ефективного обробітку ґрунту, мінімізувати негативний вплив на його структуру, підвищити продуктивність оранки та забезпечити енергетичну та екологічну ефективність землеробства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. LEMKEN [Електронний ресурс]. Режим доступу <http://lemken.com.ua/ua/>
2. Kverneland [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://sng.kverneland.com>.
3. Kuhn [Електронний ресурс]. - Електрон. дан., 2025. - Режим доступу <http://www.kuhn.ua>
4. Gregoire Besson [Електронний ресурс]. - Режим доступу https://astra-group.ua/catalogue/tehnika/plugi/gregoire_besson-62.html.
5. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини. Підручник. 2-е вид. К: Каравела, 2008. 552с.
6. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку.: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. К.: Вища освіта, 2005. 464 с.
7. Сисолін П.В. та ін. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи конструкція, проектування: Підручник для студентів вищих навчальних закладів із спеціальності «Машини та обладнання с.г. виробництва» (За ред. М.Г. Черновола). Кн.1. К.: Урожай, 2001.384с.
8. <https://www.deere.ua/uk-ua>
9. ASAE D497.7 MAR2011 - Agricultural Machinery Management Data, ASABE standard. ASAE S217.12 DEC01 (ISO+730-1:1994) Three-Point Free-Link Attachment for Hitching Implements, ASABE standard.
10. Bauer, F., Porteš, P., Slimarík, D., Cupera, J., Fajman, M. 2017. Observation of load transfer from fully mounted plough to tractor wheels by analysis of three point hitch forces during ploughing. Soil Till. Res. 172: 69-78.
11. Булгаков В.М. Агрегатування плугів / В.М.Булгаков, В.І.Кравчук, В.Т. Надикто. – К.: Аграрна наука. – 2008. – 152 с. [С. 74-77].
12. Надикто В.Т. Щодо доцільності використання оборотного плуга / В.Т. Надикто // Вісник аграрної науки, 2014. С. 51-54.

13. Посібник. Машини для обробітку ґрунту та сівби / За ред. Кравчука В.І., Мельника Ю.Ф. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 2009. 288 с.
14. ASAE D497.7 MAR2011 – «Дані з управління сільськогосподарськими машинами», стандарт ASABE. ASAE S217.12 DEC01 (ISO+730-1:1994) – «Триточкове вільноланкове приєднання для агрегування знарядь», стандарт ASABE.
15. Jeshvaghani, H.S., Dehkordi, S.K.H., Samani, M.F., Dehkordi, H.R., Branch, S. 2013. Порівняння та оптимізація графічних методів проєктування корпусів лемішно-полицевого плуга із використанням комп'ютерного моделювання. *Journal of American Science*, 9:414–420.
16. Saunders, C. 2002. **Оптимізація роботи малоглибинних швидкісних лемішно-полицевих плугів.** Дисертація на здобуття ступеня PhD, Університет Кренфілда.
17. Das, B.M. 2002. **Принципи геотехнічної інженерії.** Brooks Cole/Thompson Learning.