

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

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра механіки та інженерії агроєкосистем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**АНДРОСОВИЧ ІВАН СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 620.92

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Розробка методу управління висотою штанги самохідних  
обприскувачів**

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

\_\_\_\_\_ Андросович Іван Сергійович

**Керівник роботи**

Грабар І. Г.

доктор технічних наук, професор

**Житомир – 2020**

## АНОТАЦІЯ

**Андросович Іван Сергійович. Розробка методу управління висотою штанги самохідних обприскувачів.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

У цьому дослідженні розглядалися можливості застосування змінного демпфування підвіски з метою управління небажаним поворотом штанги самохідного обприскувача. Інтелектуальне управління швидкістю демпфування штанги зменшило крен штанги та покращило контроль її висоти.

Для моделювання та оцінки успішних методів керування висотою штанги із застосуванням змінного демпфування було використано програмне забезпечення CANbus. Метод управління був розроблений з використанням даних від датчиків на обприскувачі щодо повороту штанги та миттєвого збільшення швидкості демпфування.

Польові випробування проводилися на трьох типах агресивності місцевості: м'який, середній та агресивний.

Підвищена швидкість демпфування, як виявилось, пом'якшила рух штанги щодо шасі обприскувача. Контроль висоти штанги був значно покращений під час значних нахилів шасі обприскувача.

*Ключові слова: самохідний обприскувач, висота штанги, крен штанги, демпфування, система управління*

## ANNOTATION

**Androsovykh Ivan Serhiyovych. Development of a method for controlling the height of self-propelled sprayers boom roll. - Qualification work on the rights of the manuscript.**

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

This study considered the possibility of using variable suspension damping to control unwanted rotation of the self-propelled sprayer rod. Intelligent boom damping speed control has reduced boom roll and improved height control.

CANbus software was used to model and evaluate successful bar height control methods using variable damping. The control method was developed using data from the sensors on the sprayer regarding the rotation of the rod and the instantaneous increase in the damping speed.

Field trials were conducted on three types of terrain aggression: mild, medium, and aggressive.

The increased damping speed was found to mitigate the movement of the boom relative to the sprayer chassis. The boom height control was significantly improved during significant tilting of the sprayer chassis.

*Keywords: self-propelled sprayer, boom height, boom roll, damping, control system*

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1. Обґрунтування необхідності вдосконалення системи контролю висоти штанги самохідних обприскувачів.....	6
Висновки до розділу.....	11
Розділ 2. Визначення характеристик положення штанги обприскувача при постійному демпфуванні.....	12
Висновки до розділу.....	16
Розділ 3. 2D-модель системи підвіски штанги із змінним демпфуванням.....	17
Висновки до розділу.....	22
Висновки.....	23
Список використаних джерел.....	24
Додаток А.....	27

## Вступ

Самохідні обприскувачі відіграють важливу роль у сільському господарстві, вносячи хімічні речовини у посіви для боротьби з бур'янами та шкідниками.

У цьому дослідженні розроблено та випробувано метод підвищення стабільності висоти штанги обприскувача.

Процес обприскування повинен бути керованим таким чином, щоб розпилювальна штанга підтримувала необхідну висоту для рівномірного покриття оброблюваної поверхні. Відхилення від необхідної висоти дозволяє зовнішнім факторам, таким як вітер, створювати можливості для дрейфу бризок хімічних речовин і потенційно шкодити сусіднім культурам та навколишньому середовищу.

На систему підвіски розпилювальної штанги через шасі впливає рельєф місцевості. Активація висоти окремих крил, що здійснюється рухом штанги, також генерує похибки необхідної висоти по довжині штанги.

У цьому дослідженні розглядалися можливості застосування змінного демпфування підвіски на поворот штанги з метою управління небажаним креном штанги. Інтелектуальне управління швидкістю демпфування штанги може мінімізувати крен штанги та покращити контроль її висоти.

Програмне забезпечення для віртуального моделювання CANbus було використане під час процесу розробки параметрів змінного демпфування для моделювання сценаріїв повороту штанги та визначення оптимального методу демпфування. Метод управління був розроблений з використанням даних від датчиків на обприскувачі для виявлення повороту штанги та миттєвого збільшення швидкості демпфування.

Підвищена швидкість демпфування, як виявилось, пом'якшила рух штанги щодо шасі обприскувача. Однак контроль висоти штанги був значно покращений лише тоді, коли змінне демпфування застосовували під час значних нахилів шасі. У багатьох випадках контроль положення крила

штанги зі змінною швидкістю демпфування все ще створює помилку висоти штанги, тобто метод потребує подальшого доопрацювання.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження – розробити метод управління висотою штанги самохідного обприскувача шляхом зміни параметрів демпфування системи підвіски штанги.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- обґрунтувати необхідність вдосконалення сучасних систем контролю висоти штанги самохідних обприскувачів;

- визначити характеристики положення штанги обприскувача при постійному демпфуванні для отримання бази порівняння із системою контролю зі змінним демпфуванням;

- розробити 2D-модель системи підвіски штанги із змінним демпфуванням та оцінити її достовірність;

- визначити оптимальні параметри реалізації демпфування для мінімізації відхилення висоти для модельованих умов.

**Об’єкт дослідження:** система підвіски штанги самохідного обприскувача.

**Предмет дослідження:** вплив параметрів демпфування на положення штанги самохідних обприскувачів при різних умовах їх експлуатації.

Методи дослідження: дослідження виконано з використанням методів механіки та електроніки. Експериментальні дослідження проведено із застосуванням методів теорії імовірності, математичної статистики, імітаційного моделювання.

## Розділ 1

# ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВИСОТИ ШТАНГИ САМОХІДНИХ ОБПРИСКУВАЧІВ

Обприскування в сільському господарстві є ключовим фактором для підтримки високих урожаїв сільськогосподарських культур, що одночасно контролює негативний вплив бур'янів, шкідників та хвороб [1–2]. Виробники можуть використовувати різноманітні гербіциди та пестициди до своїх культур за допомогою сільськогосподарського обприскувального обладнання.

Обприскувачі можуть тягнутися за трактором (як інструмент) або мати можливість самохідного руху. У обох випадках використовується розпилювальна штанга, яка видає хімічні речовини з бортового резервуару. Форсунки, розташовані вздовж штанги, розбризкують рідкі хімічні речовини для рівномірного покриття оброблюваних поверхонь. Виробники прагнуть до максимальної ефективності обробітку з точки зору витрати часу та хімічних речовин. Як результат, обприскувальне обладнання стало більшим, швидким та оснащеним програмним забезпеченням [3–5].

Самохідні обприскувачі здатні нести на борту до 6000 літрів хімічних речовин і мають здатність обприскувати ділянку шириною до 36 метрів під час роботи. В результаті за день можна обприскати сотні гектарів. Обприскувачі можуть працювати в різних умовах місцевості та мають широкий діапазон швидкостей залежно від вегетаційного періоду рослин. Обприскувачам важливо адаптуватися до робочого середовища та підтримувати контрольоване застосування хімікатів, яке залежить від таких факторів як рельєф місцевості, вітер та рух обприскувача. Якщо ці фактори врахувати за допомогою вдосконалених систем контролю, процес обприскування можна зробити більш передбачуваним та ефективним, що принесе значний зиск виробникам.

Хімічний дрейф під час внесення робочого розчину є важливою причиною для поліпшення контролю висоти штанги. Дрейф виникає, коли розпилювані хімікати, які застосовуються, контактують із землею або рослиною поза межами цілі. Це може призвести до шкоди здоров'ю людей, забруднення навколишнього середовища та пошкодження майна [6–8].

Багато факторів, таких як вітер, висота штанги, профіль місцевості та характеристики форсунок можуть спричинити дрейф хімічних речовин. Якщо частинки робочого розчину виприскуються на висоті вище необхідної, тоді час руху вниз збільшується, і це дозволяє вітру (якщо він присутній) розносити частинки розпилення в сторони. І навпаки, якщо хімікати виприскуються нижче необхідної висоти занадто близько до посівів, то деякі посіви отримають вищу норму внесення (л/га), що може призвести до майбутньої шкоди.

Впровадження систем контролю висоти та повороту штанги під час застосування хімікатів призведе до бажаного рівномірного розприскування робочих розчинів по полю.

Виробники самохідних обприскувачів випускають системи управління висотою штанги, які керують висотою положення кожного крила. Ці системи забезпечують поліпшення контролю висоти штанги, але створюють нахил (крен) розпилювальної штанги (рис. 1.1). Коли шасі обприскувача проїжджає по похилій місцевості, штанга, як правило, йде за нахилом машини.

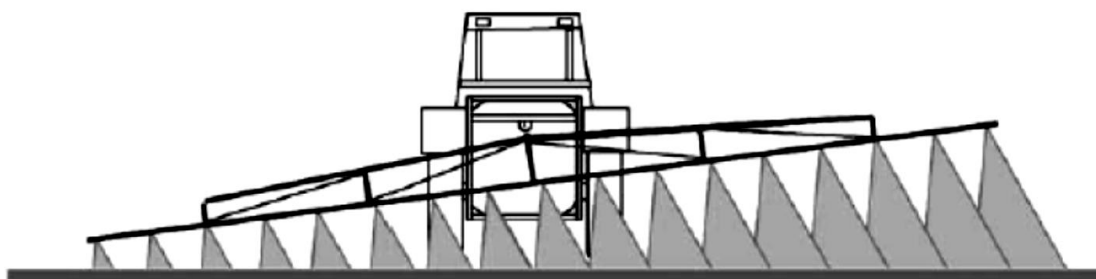


Рис. 1.1. Крен штанги обприскувача



Виробники обприскувачів прагнуть підвищити стабільність штанги. Крен штанги - це чинник, що має потенціал для управління та контролю. Інші чинники, такі як затримки гідравлічного спрацьовування, підвіска шасі та програмне забезпечення для управління висотою штанги, набагато складніші для удосконалення через фізичні обмеження машини та втрати для комфорту оператора. Вивчення нових методів управління штангою необхідне виробникам, оскільки постійно зростає попит на підтримку необхідної висоти з боку замовників.

Введення легких обприскувачів із вуглецевого волокна викликало занепокоєння щодо керованості штанги, оскільки вони схильні до руйнування при контакті із землею. Вуглецеве волокно в основному використовуються на найширших штангах з метою зменшення ваги, однак вони контактують із землею під меншими кутами нахилу, ніж коротші штанги. Їх дуже дорого ремонтувати, тому контроль за їх положенням для уникнення пошкодження, дуже важливий.

Штанга обприскувача призначена для кочення незалежно від шасі, до якого вона закріплена. Залежно від конструкції та виробника обприскувача, механізми, що утримують штангу, можуть включати нерухомі шарнірні та подвійні маятникові ланки. Нерухомий шарнір теоретично описується як штанга, приєднана до шасі в одній точці, на якій вона може вільно обертатися. При подвійній конструкції маятикової тяги дві ланки з'єднують підвісну штангу з шасі, і їх з'єднання можуть вільно обертатися.

У всіх конструкціях існують обмеження, на скільки градусів штанга може обертатися. Упори, розміщені на штанзі та шасі, обмежують кут нахилу. У багатьох випадках вони використовуються для захисту інших компонентів під час надмірних кренів штанги.

Амортизатори регулюють кутову швидкість нахилу та прискорення штанги, надаючи силу опору руху штанги та шасі. Більш висока амортизація призводить до зменшення здатності штанги вільно рухатися, тоді як менша – дозволяє збільшити крен штанги. Центрувальні пружини, як правило,

розміщуються паралельно амортизаторам штанги, щоб допомогти підтримувати правильне положення штанги щодо шасі. Коли обприскувач працює на похилому пагорбі або рівній місцевості, ці пружини змушують штангу розташовуватись паралельно куту нахилу поверхні.

У багатьох випадках поворот штанги неконтрольований, і це негативно позначається на системах автоматичного регулювання висоти. Вимушений крен штанги виникає, коли крила розпилювальної штанги піднімаються/опускаються.

Самохідні обприскувачі складаються з шасі з прикріпленим до нього розпилювальним обладнанням. На шасі розміщено багато компонентів, таких як двигун, трансмісія, робоча кабіна та ведучі колеса. Підвіска шасі є важливою частиною для обприскувача та оператора, оскільки вона демпфує (поглинає енергію) під час роботи.

Обприскувачі можуть працювати зі швидкістю вище 32 км/год, тому шасі має мати надійну систему підвіски. У деяких конструкціях на кожній осі коліс використовуються активно керовані подушки безпеки, щоб витримати вагу машини і діяти як подушка для ударів об поверхню ґрунту. Також можуть бути присутні демпфери амортизаторів та пружини, розташовані на кожній осі колеса, щоб забезпечити подальший контроль підвіски.

У цьому дослідженні стандартні постійні демпфери та пружини були замінені регульованими демпферами з електронним управлінням, щоб мати можливість змінювати швидкість демпфування під час роботи. Вхідний струм (від 0 до 2000 мА) до кожного змінного демпфера контролював швидкість їх демпфування. Вони встановлювалися за допомогою перехідного кронштейна, який компенсував меншу довжину ходу змінного демпфера, при цьому кут розміщення залишився незмінним (рис. 1.2).

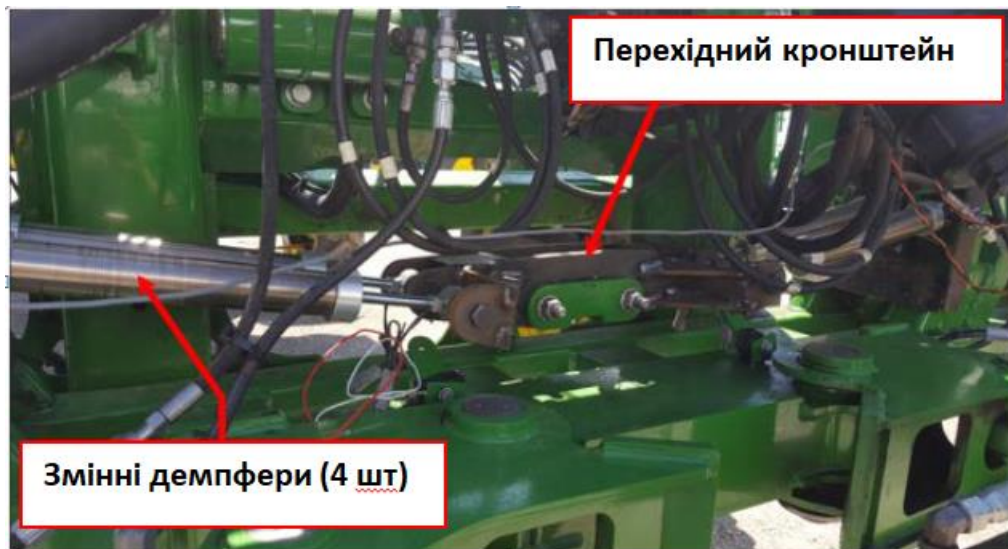


Рис. 1.2. Установка регульованих демпферів з електронним управлінням

Сучасні самохідні обприскувачі використовують датчики для контролю за обприскуванням. Датчики обмінюються даними з контролерами машини за допомогою мереж (CANbus) [9–12].

Найбільш відповідними датчиками для підтримання необхідної висоти штанги розпилення є ультразвукові датчики висоти, розташовані вздовж довжини штанги (рис. 1.3). Вони вимірюють відстань від штанги до землі та до поверхні врожаю.

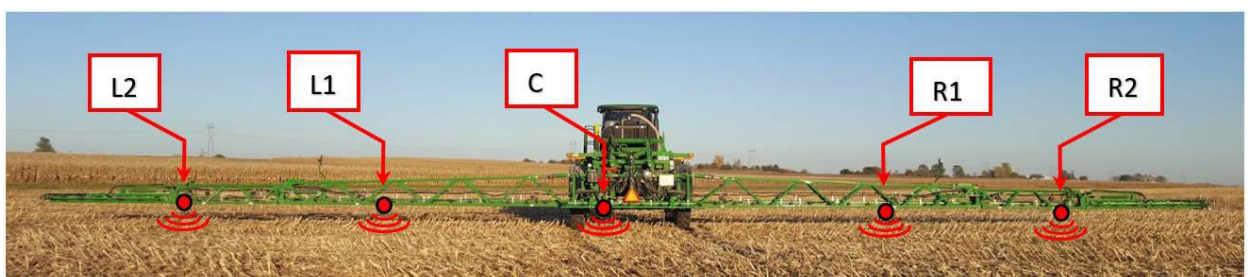


Рис. 1.3. Положення та позначення ультразвукових датчиків

У деяких конструкціях для вимірювання кута штанги щодо шасі обприскувача використовується поворотний потенціометр. Його сигнал є ефективним засобом оцінки крену штанги під час обприскування. Механізм зчеплення, підключений одним кінцем до нерухомої центральної рами, а

другим кінцем - до підвішеної штанги, обертає цей датчик під час руху штанги вздовж дугового шляху підвісних ланок.

Окремо висоту лівого або правого крила можна регулювати за допомогою гідроциліндрів, підключених до кожного крила. Активні системи управління висотою штанги регулюють висоту крил під час роботи, щоб підтримувати необхідні висоти. Для обприскувача, що використовується в цьому дослідженні, додаткові струнні потенціометри розміщували на гідравлічних циліндрах нахилу лівого та правого крила для вимірювання довжини їх розтягування. Використовуючи ці калібровані датчики, можна було регулювати висоту крил до певних положень, щоб проводити послідовні повторення випробувань висоти штанги.

GPS-приймач обприскувача розташований біля передньої частини даху обприскувача та має безперешкодний вид на небо для супутникового зв'язку. Він збирає масив вимірювань шасі, які можна проаналізувати за допомогою CANbus. Ці вимірювання включають кут нахилу, кут крену, швидкість повороту та швидкість руху. Вони корисні для визначення характеристик рельєфу, а також для оцінки ходових характеристик обприскувача. Ці сигнали передавалися по CANbus з частотою 10 Гц.

### **Висновки до розділу**

Отже, на сьогоднішній день для сільського господарства надзвичайно актуальною є задача мінімізації крену розпилувальної штанги в підвісних штангових системах самохідних обприскувачів. Як результат, дрейф розпилення та норми внесення розчинів можуть бути більш контрольованими для поліпшення врожайності та екологічності.

Для цього виявляється необхідним оцінити характеристики контролю висоти штангової системи з постійним демпфуванням для отримання бази порівняння.

## Розділ 2

### ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОЖЕННЯ ШТАНГИ ОБПРИСКУВАЧА ПРИ ПОСТІЙНОМУ ДЕМПФУВАННІ

Метою цього розділу було визначення характеристик положення штанги самохідного обприскувача при постійному демпфуванні. Ця інформація буде використана для встановлення бази, з якою слід порівнювати характеристики змінного демпфування.

Для випробувань був використаний самохідний обприскувач із 30-метровою розпилювальною штангою. У баку обприскувача не було рідини, а регульована ширина протектора була встановлена на 3 м.

Експеримент складався із стаціонарних випробувань активації крила та динамічних польових випробувань. Регулювання висоти крила обприскувача в режимі «автоматичного регулювання висоти розпилення» були схильні викликати крен штанги та впливати на висоту розпилення протилежного крила. Крім того, рух шасі також викликав поворот штанги, що призводило до відхилень висоти штанги.

#### Методи

Для того, щоб оцінити ефекти руху штанги під час регулювання висоти крила обприскувача, були проведені стаціонарні випробування, які передбачали підняття лівого крила обприскувача та моніторинг реакції підняття на правому крилі (табл. 2.1). CAN-скрипт (CAPL) у програмному забезпеченні для розробки та випробувань CANbus дозволив послідовно активувати крила на обприскувачі, використовуючи управління циліндрами підйому крила розпилювальної штанги. Перед кожним повторним випробуванням розпилювальна штанга встановлювалася в рівне положення відносно землі. Кожне крило розташовувалось на попередньо визначеній довжині з використанням даних ротаційних потенціометрів на циліндрах крила.

Коли ліве крило було підняте, максимальний номінальний струм подавався на відповідний електромагнітний клапан на циліндрі крила. Цей струм приводив до такої ж швидкості підйому крила, як і за допомогою кнопки підйому в кабіні обприскувача. Рух підняття крила було зупинено після того як потенціометр виміряв 0,15 м переміщення крила. Переваги використання сценарію CAPL включали послідовні повторення та виключали можливість помилки людини під час процесу тестування. Журнали даних, зібрані за допомогою CANbus, використовувались для оцінки вихідних даних обприскувача під час випробувань, щоб кількісно оцінити вплив рухів крила на викликаний крен штанги.

Таблиця 2.1

Опис стаціонарного підняття крила

Тип демпфування	Частота обертання двигуна (об/хв)	Підвищення швидкості циліндра лівого крила (мм/с)	Тривалість (с)	Повтори
Постійний	2450	90	1,0	15

### **Польові умови рельєфу**

Польові випробування використовувались для дослідження впливу на обприскувач природніх умов рельєфу, які впливали на динаміку штанги та експлуатаційні характеристики транспортного засобу.

Обприскувач експлуатувався на місцевому полі із скошеним пирієм. Це поле мало різноманітні особливості рельєфу, включаючи рівну горизонтальну поверхню, пагорби та трав'яну смугу у воді. Як результат, можна було випробувати обприскувач на місцевості різного ступеню складності. Для польових випробувань було виділено три типи складності місцевості, і вони були відтворені за допомогою руху обприскувача в різних місцях поля.

«Помірний» рельєф складався з рівної поверхні без канав та водних шляхів.

«Середній» рельєф був відтворений в результаті використання обприскувача в районі, де були широкі та пологі пагорби. Профіль ґрунту на всій довжині штанги постійно змінювався, така місцевість є репрезентативною для багатьох ферм.

“Агресивна” місцевість була репрезентативною для похилого рельєфу. Сюди входили дуже різкі зміни в положенні шасі, спричинені проїздом через водний шлях. Щоб відтворити цей прохід, обприскувач перетнув водний шлях із смуги трави під кутом 45 градусів. Значна зміна кута руху обприскувача вплинула на підвіску шасі, а також на поворот штанги. Для цілей тестування не відбувалося зменшення швидкості в жодній точці під час пробного запуску.

### **Полюві випробування**

Для кожного типу місцевості (м'якого, середнього та агресивного) було здійснено 10 проходів із вимкненою та ввімкненою автоматизованою системою висоти штанги. Система управління регулювала висоту кожного з крил на основі даних ультразвукових датчиків штанги. Дані датчиків обприскувача були зібрані з CANbus під час випробувань на місцях.

### **Похибка висоти штанги від підняття одного крила**

Під час стаціонарних випробувань було очевидним, що підняття лівого крила призвело до вимушеного повороту штанги та похибок у висоті для правого крила. Було виміряно чотири ключові динамічні характеристики обприскувача: висота штанги (ультразвуковий датчик R2, рис. 1.3), кут нахилу штанги, швидкість повороту штанги та кут нахилу шасі (рис. 2.1).

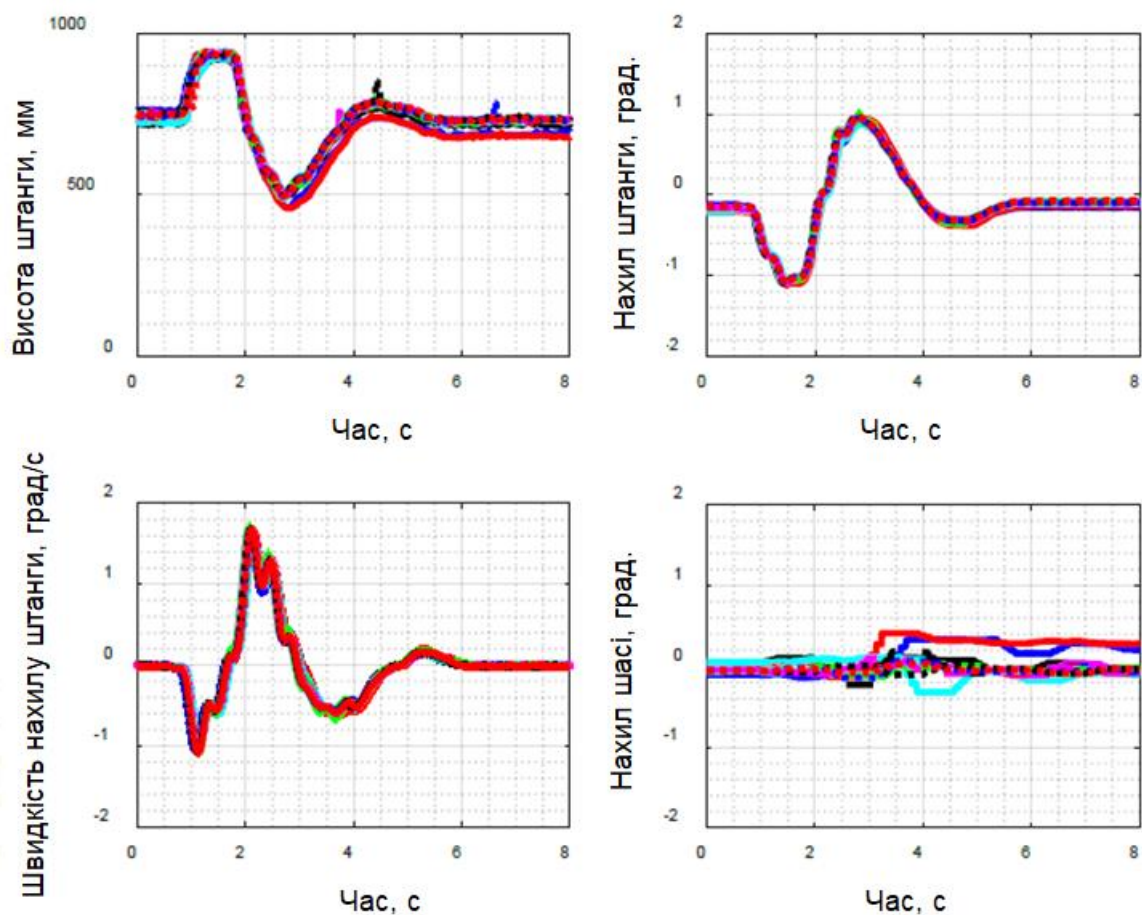


Рис. 2.1. Характеристики руху штанги від підняття лівого крила (декілька повторених експериментів)

Дані, зібрані від зовнішнього правого ультразвукового датчика (R2) та датчика повороту штанги, ефективно вказували, як початкова сила від запуску крила впливала на крен та висоту штанги. Спочатку рух лівого крила призвів до того, що штанга проверталася проти годинникової стрілки (дивлячись ззаду), що підняло праве крило вище встановленої висоти.

Потім, коли ліве крило зупинилося, його імпульс перенаправив рух штанги за годинниковою стрілкою та праве крило опустилося нижче початкової заданої висоти. Приблизно через 3-4 секунди після того, як ліве крило зупинило свій висхідний хід, існував час осідання штанги, де воно злегка коливалось, поки не досягло збалансованого стану і рух крену штанги не припинився.



## Вплив складності місцевості

Дані, зібрані з обприскувача під час польових випробувань (рис. 2.2), використовувались для оцінки показників руху та висоти штанги. Три типи рельєфу - м'який, середній та агресивний - обприскувач пройшов зі швидкістю 19,3 км/год. Для кожного типу місцевості було зроблено десять проходів.



Рис. 2.2. Швидкість нахилу шасі на рельєфі різного типу

Результати, наведені на рис. 2.2 продемонстрували, що рух повороту при проходженні водяної смуги сприяв підтримці штанги на агресивній місцевості, що призвело до зниження швидкості нахилу осі порівняно із місцевістю середньої складності.

## Висновки до розділу

В результаті випробувань були сформовані базові значення для подальшого порівняння із дослідженнями змінного демпфування штанги. Дані, зібрані в результаті проведених випробувань, будуть використані для налаштування 2D-моделі на наступному етапі цього дослідження.

### Розділ 3

## 2D-МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ПІДВІСКИ ШТАНГИ ІЗ ЗМІННИМ ДЕМПФУВАННЯМ

У цьому розділі було здійснене моделювання впливу змінного демпфування на висоту штанги та проведена перевірка розробленої моделі. Після перевірки здатності моделі імітувати динаміку системи підвіски штанги обприскувача, вона використовувалась у кількох моделюваннях, які визначали оптимальну швидкість демпфування для мінімізації крену штанги та інші параметри демпфування в різних умовах місцевості.

### **Розробка моделі**

Спрощена 2D-модель системи підвісної штанги була розроблена з використанням розмірів самохідного обприскувача з 36-метровою розпилювальною штангою (рис. 3.1) [13–20].

Рухом штанги керували за допомогою двох комплектів пружин та амортизаторів, а система підвіски шасі імітувалася за допомогою пружин та амортизаторів. Привід довжини, прикріплений до обох крил, забезпечував індивідуальне регулювання висоти крила, подібно тому, як гідравлічні циліндри використовувались на виробничому обприскувачі. Ці виконавчі механізми генерували поворот штанги від рухів крила, які досліджувалися віртуально.

В процесі розробки моделі була додана додаткова система підвіски, яка дозволила шинам мати кутовий ступінь свободи навколо точки контакту шини з землею. Цей рух представляв реалістичну поведінку підвіски шасі обприскувача, яку спостерігали під час попередніх випробувань на полі.

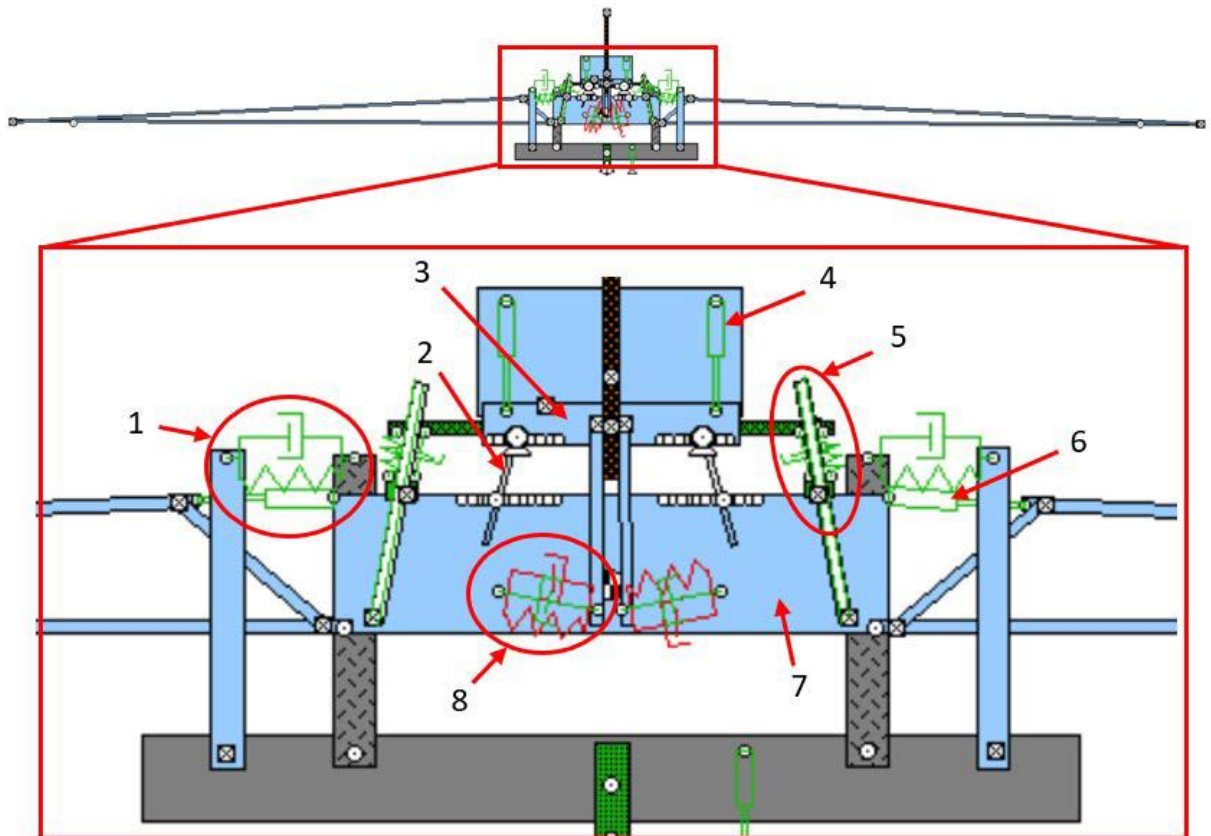


Рис. 3.1. 2D-модель системи підвіски штанги:

- 1 – система підвіски шин,
- 2 – підвісна ланка розпилювальної штанги,
- 3 – центральна рама шасі,
- 4 – приводи для регулювання висоти штанги,
- 5 – система підвіски шасі обприскувача,
- 6 – гідроциліндр висоти крила,
- 7 – центральна рама,
- 8 – система повороту штанги

Під час моделювання із частотою 20 Гц реєструвались вимірювання як кутів нахилу, так і швидкості нахилу шасі та розпилювальної штанги, а також дані про висоту штанги. Кути розраховували, використовуючи різницю в кутах (між шасі та розпилювальною штангою або між шасі та землею), а швидкість нахилу була функцією зміни кута на одному 0,05 секундному кроці під час моделювання. Для вимірювання висоти на штанзі додавали

точки в тому самому розташуванні, їх вертикальне положення щодо рівня землі також реєстрували з частотою 20 Гц.

### **Перевірка моделі**

Процес перевірки моделі полягав у підданні моделі стаціонарному випробуванню на підняття крила та польовому випробуванню, де динаміку управління штангою можна було порівняти з відомими результатами.

Збільшення швидкості демпфування під час активації крила було здійснено одночасно з командним сигналом підйому/опускання крила. Під час періоду спрацьовування циліндра крила швидкість спрацьовування демпфування підтримувалась постійною на заданому значенні. Як тільки активація зупинялася, швидкість спрацьовування демпфування все ще трималась постійною протягом 0,5 секунди, а потім лінійно зменшувалась протягом ще 0,5 секунди. Швидкість підйому циліндра лівого крила становила 90 мм/с, а тривалість спрацьовування 1,0 секунди. Тест оцінював, як величина швидкостей демпфування впливала на зміну висоти R2. Швидкість демпфування складала 0, 5, 8, 12, 16, 25, 44, 88, 175 кН·с/м.

Для проведення експерименту з порівняння різних коефіцієнтів демпфування (таблиця 3.1) та визначення того, який показує найкращий контроль висоти штанги (тобто найнижче стандартне відхилення R2), була використана розроблена модель. Для цих випробувань час витримки та час зменшення/збільшення швидкості демпфування становив 0,5 секунди.

Моделювання для оцінки стилів демпфування складалося з нахилу шасі з амплітудою 3 градуси та періодом 4 секунди. Ці параметри представляли динамічні умови шасі, подібні до умов перетину смуги трави на полі. Час утримання спускового гачка та час зниження крила було встановлено на 0,5 секунди. Кожне моделювання стилю демпфування тривало 30 секунд і мало швидкість 123 кН·с/м. Дані про висоту (відносно рівня землі) представлені на рис. 3.2.

## Методика контролю висоти штанги

Стиль демпфування	Опис події, яка активує демпфування	Сигнал датчика, який контролюється
Постійне демпфування	Постійний коефіцієнт швидкості демпфування	–
2	Зміна напрямку нахилу шасі	Кут нахилу шасі
3	Рух шасі та штанги в протилежних напрямках	Кут нахилу шасі, кут нахилу штанги
4	Кут штанги щодо землі перевищує кут шасі	Кут нахилу шасі, кут нахилу штанги
5	Швидкість штанги відносно землі перевищує швидкість крену шасі	Швидкість нахилу шасі, швидкість крену штанги
6	Похибка висоти штанги розпилювача зведена до мінімуму за допомогою відповідного напрямку крену шасі	Висота R2 та L2, швидкість крену шасі

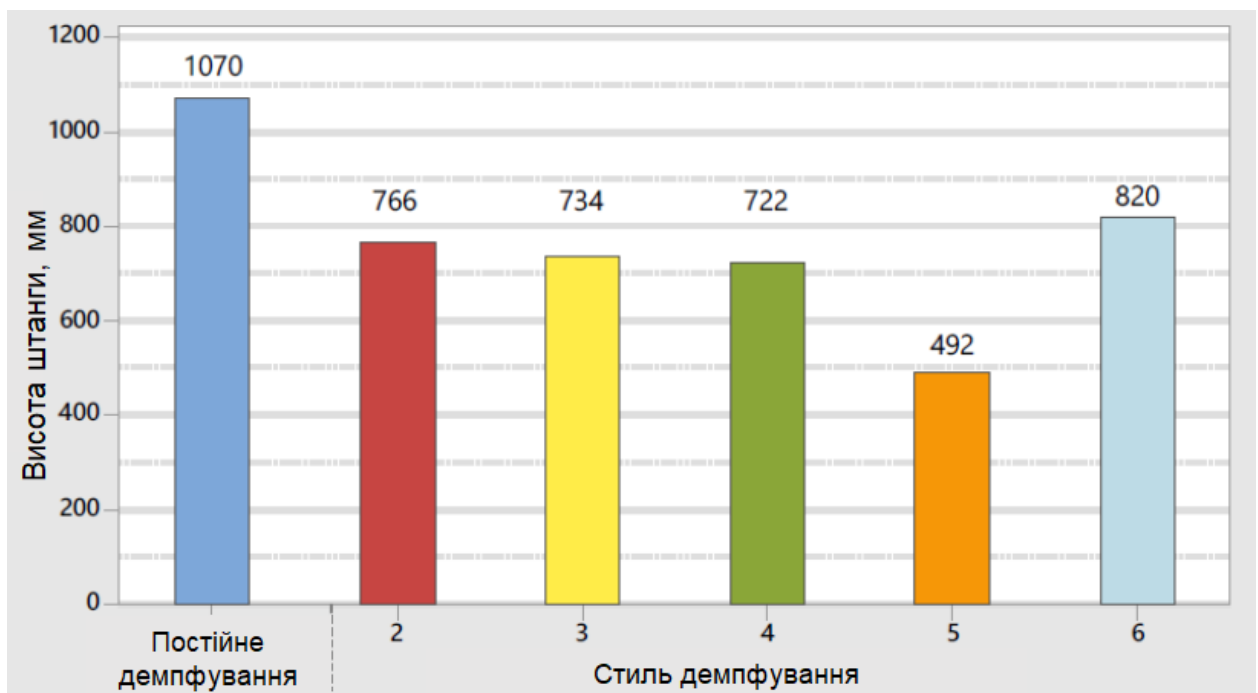


Рис. 3.2. Результати моделювання стилів демпфування для контролю висоти штанги

Стиль демпфування 5 характеризується найменшим відхиленням штанги розпилювача від необхідної висоти. Він має зниження стандартного

відхилення  $R_2$  на 50% порівняно із системою постійного демпфування, як у відомих обприскувачів. Логіка цього стилю спускового механізму застосовувала підвищену швидкість демпфування, коли швидкість повороту штанги відносно землі була більша, ніж швидкість повороту шасі. Ця ситуація виявила (шляхом моніторингу швидкості повороту шасі та швидкості повороту штанги), що збільшення демпфування нахилу штанги сповільнило кутову швидкість штанги щодо шасі. Оскільки шасі поверталось в інший бік, кутова швидкість штанги щодо землі була зменшена і врешті-решт змінена; таким чином, утримуючи крило від контакту з землею і піднімаючи його вгору до необхідної висоти. Після того, як розпилувальна штанга була стабілізована поблизу необхідної висоти, швидкість демпфування була знижена до робочої швидкості за замовчуванням. Час утримання спускового гачка та час зниження давали змогу швидкості демпфування залишатися на збільшеному рівні протягом достатнього часу (в цілому 1,0 секунди в цьому моделюванні) та повернутися до попереднього рівня демпфування.

Далі оцінювали стиль демпфування 5 для вивчення його можливостей у більш широкому діапазоні умов нахилу шасі (рис. 3.3).

Параметри дали можливість визначити оптимальні часові параметри спускового гачка та мінімізувати стандартне відхилення  $R_2$  для всіх модельованих умов.

Найефективнішим параметром демпфування було утримання спускового гачка протягом 0,5 секунди та швидке його зниження протягом 0,1 секунди. Таким чином, 0,5 секунди було достатньою кількістю часу для уповільнення небажаного крену штанги.

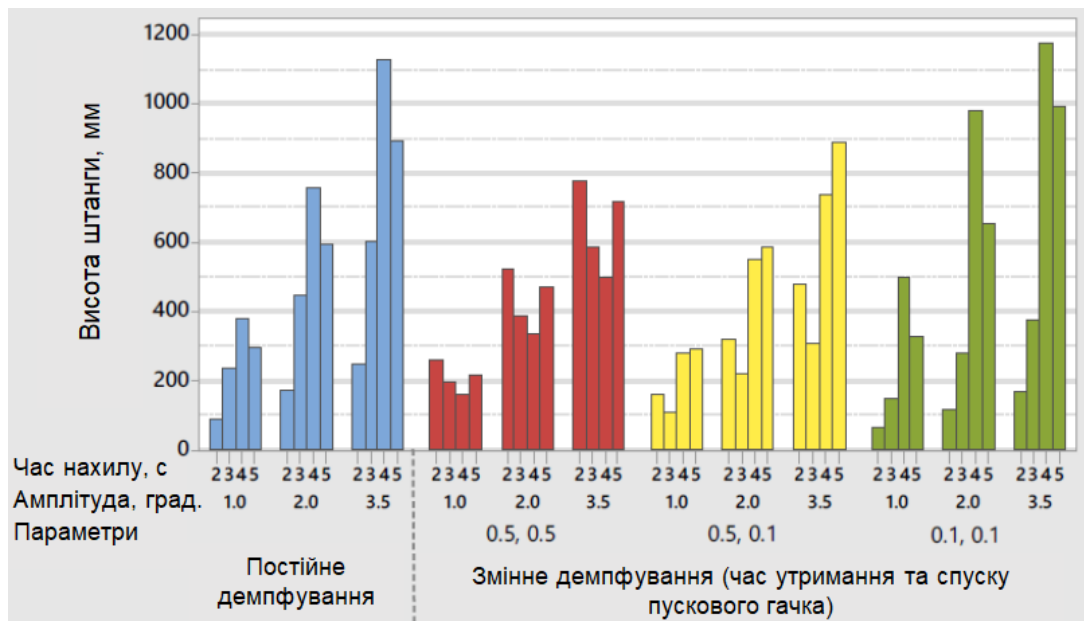


Рис. 3.3. Оцінка продуктивності стилю демпфування 5 для різних параметрів утримання та спуску пускового гачка

### Висновки до розділу

2D-модель системи підвіски штанги обприскувача продемонструвала близькі характеристики повороту та висоти штанги порівняно з даними випробувань реальних обприскувачів. Похибка між моделлю та результатами польових досліджень становила менше 6%. Здатність моделі достатньо точно моделювати крен штанги дозволила виконати дослідження із збільшенням швидкості демпфування штанги. Моделювання показало, що похибка висоти штанги, спричинена рухом штанги під час активації висоти крила, була зменшена більш ніж на 50% при спробі збільшення швидкості штанги протягом періоду активації. Збільшена швидкість зменшила відносний рух між шасі та розпилувальною штангою, діючи як гальмо. Оптимальними параметрами демпфування є утримання спускового гачка протягом 0,5 секунди та швидке його зниження протягом 0,1 секунди. Моделювання використало менше ресурсів, ніж проведення польових випробувань обприскувача в полі.

## ВИСНОВКИ

Змінне демпфування представляє можливості для підвищення ефективності контролю висоти штанги самохідних обприскувачів за рахунок інтелектуального управління підвісною системою штанги. Мінімізація похибки необхідної висоти штанги обприскувача, спричиненої її поворотом, є важливою задачею для задоволення зростаючого попиту на точне застосування хімічних речовин.

У роботі було досліджено та проаналізовано декілька методів демпфування повороту штанги зі змінним коефіцієнтом для вивчення їх впливу на висоту штанги. Засоби двовимірного моделювання були використані для моделювання динамічних характеристик підвісної штанги обприскувача. У контрольованому середовищі було випробувано кілька стилів змінного демпфування і таким чином, заощаджено час на визначення успішного методу змінного демпфування.

Порівняно з постійними швидкостями демпфування виробничого обприскувача, змінні методи демпфування під час екстремальних положень шасі та крил зменшують відхилення положення крила штанги від необхідної висоти.

Разом з тим, існують можливості для подальших досліджень. Наприклад, варто у подальшому оцінити швидкість демпфування нижчу, ніж використовується в цьому дослідженні.

У майбутніх дослідженнях рекомендується замінити приймач GPS на інерційний блок вимірювання (ІМУ), який має можливість вимірювати кути та швидкості нахилу шасі в напрямках X, Y та Z на частоті 100 Гц. Затримки показань датчиків та будь-які затримки під час передачі сигналу в мережі CANbus вплинуть на продуктивність системи управління та здатність штанги обприскувача підтримувати стабільність.

В подальших дослідженнях було б доцільним замінити амортизатори штанги самохідного обприскувача на магніторологічні (MR) демпфери.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лысов А.К. Совершенствование механизации опрыскивания растений / А.К.Лысов // Защита растений. — 2003. — №9. — С. 38—39.
2. Технологія виробництва сільськогосподарської продукції: Навчальний посібник для аграрних вищих навчальних закладів I—II рівнів акредитації / Ярош Ю. М., Трусів Б. А. — К.: Український Центр духовної культури, 2005. — 524 с.
3. Сільськогосподарські та меліоративні машини: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.О. Дубровін, Т.Д. Іщенко та ін.; За ред. Д. Г. Войтюка. — К.: Вища освіта, 2004. — 544 с.
4. Прокопенко С. Ф. Малообъемные обпрыскивание с.-х. культур / С. Ф. Прокопенко, В. В. Ченцов — М.: Агропромиздат, 1989. — 61с.
5. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин: навч. посібник // Т. 1 : Машини для захисту рослин від шкідників і хвороб, ч. 4. — Х. : ОКО, 2002. — 272 с.
6. Агроекологія: Теорія та практикум. За ред. В.М. Писаренка. Полтава. Інтерграфіка, 2003. — 318 с.
7. Минеев В.Г. Экологические проблемы агрохимии. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. — 283 с.
8. Машини для химической защиты растений в инновационных технологиях: науч. аналит. обзор. — М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. — 124 с.
9. Третьяков С.А. CAN — локальная сеть контроллеров. Электроника, №9/98.  
Режим доступу: [https://star.inp.nsk.su/~kozak/canbus/980926\\_doc-01.pdf](https://star.inp.nsk.su/~kozak/canbus/980926_doc-01.pdf)  
(дата звернення: 01.05.2020).
10. Орехов Д.И. Промышленная система контроля и анализа данных на основе распределенных контроллеров, объединенных сетью CAN-BUS /

Орехов Д.И., Чепурнов А.С., Сабельников А.А. // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2008. № 2. С. 126-131.

11. Хвощ С.Т. Применение шины can-bus в распределенных системах сбора и обработки информации в реальном масштабе времени / Хвощ С.Т., Луковкин А.В., Лютов А.Г. // Информационно-управляющие системы. 2002. № 1 (1). С. 35-39.

12. CAN-технологии: для начинающих и принимающих решение. Чепурнов А. Компоненты и технологии. 2002. № 3 (20). С. 146-148.

13. Щеголихина Т.А. Современные самоходные штанговые опрыскиватели. Техника и оборудование для села. 2012. № 7. С. 16-21.

14. Козлов И.Б. Результаты проведения полевых испытаний опрыскивателя на базе самоходного шасси ВТЗ-30СШ / Козлов И.Б., Козлова А.И. // В сборнике: Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий. Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. 2014. С. 104-107.

15. Петухов Д.А. Техничко-эксплуатационные показатели самоходных опрыскивателей / Петухов Д.А., Юзенко Ю.А. // АгроСнабФорум. 2018. № 2 (158). С. 13-17.

16. Щеголихина Т.А. Современные самоходные опрыскиватели зарубежных фирм. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика М. Е. Мацепуро. 2018. С. 84-87.

17. Основные технические данные новых машин, произведенных фирмой JOHN DEERE в 2004 г.: самоходные опрыскиватели, тракторы, тракторные кабины и рядковые сеялки. (США). Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2005. № 4. С. 1031.

18. Щеголихина Т.А. Интеллектуальные системы для современных опрыскивателей / Щеголихина Т.А., Неменуцкая Л.А., Коноваленко Л.Ю. // передовые достижения в применении автоматизации, роботизации и электротехнологий в АПК. Сборник статей научно-практической

конференции, посвященной памяти академика РАСХН, д.т.н., профессора И.Ф. Бородин (90 лет со дня рождения). 2019. С. 56-61.

19. Щеголихина Т.А. Программное обеспечение для опрыскивателей. Новости науки в АПК. 2019. № 3 (12). С. 330-333.

20. Фомина И.В. Современное состояние и тенденции развития техники для химической защиты растений / Фомина И.В., Варфоломеева М.М. // Проблемы механизации агрохимического обеспечения сельского хозяйства. 2017. № 11. С. 182-189.