

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____ Олександр ДІДИК

«__» _____ 2024 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Розробка та дослідження системи автоматичного
регулювання висоти очісуючого пристрою
рисозбирального комбайну»**

Виконав здобувач II курсу групи АК-23М-2
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

_____ Дмитро СЕМЕНЕНКО

«__» _____ 2024 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

_____ Ірина БЕРЕЗЮК

«__» _____ 2024 р.

Рецензент

_____ Іван САВЕЛЕНКО

«__» _____ 2024 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” _____ 2024 року

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Семененка Дмитра Валерійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження системи автоматичного регулювання висоти очісуючого пристрою рисозбирального комбайну

2. Керівник роботи Березюк Ірина Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити та дослідити систему автоматичного регулювання висоти очісуючого пристрою рисозбирального комбайну 1. Сучасний стан технології і засобів автоматизації збирання рису очісуванням його на корені; 2. Аналіз об'єкту управління та розробка структурної схеми системи автоматичного копіювання висоти стеблестою; 3. Проектування системи автоматичного копіювання висоти стеблестою; 4. Практична реалізація системи автоматичного регулювання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Жесан Р.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Сучасний стан технології і засобів автоматизації збирання рису очісуванням його на корені</i>	15.10.24	
2.	<i>Аналіз об'єкту управління та розробка структурної схеми системи автоматичного копіювання висоти стеблестою</i>	30.10.24	
3.	<i>Проектування системи автоматичного копіювання висоти стеблестою</i>	15.11.24	
4.	<i>Практична реалізація системи автоматичного регулювання</i>	30.11.24	

Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

Керівник роботи _____ І.А. Березюк «____» _____ 2024 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач _____ Д.В. Семененко «____» _____ 2024 р.

Анотація

на випускну кваліфікаційну роботу студента групи АК-23М-2 Семененка Дмитра Валерійовича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Розробка та дослідження системи автоматичного регулювання висоти очісуючого пристрою рисозбирального комбайну».

Випускну кваліфікаційну роботу присвячено проблемі підвищення якості збирання урожаю рису очісуючим способом. У порівнянні із традиційними способами збирання переваги цього методу полягають у тому, що в молотарку комбайна подається лише зернова частина біологічного врожаю у вигляді обчесаного зерносоломистого вороху, що характеризується високим вмістом у ньому зернової фракції.

В роботі розглянуті тенденції розвитку технології збирання зернових культур очісуючим методом. Проведений ґрунтовний аналіз об'єкта управління показав велику кількість зовнішніх збурень, що діють на очісуючий пристрій, та можливості управління його положенням відносно стеблестою. Розроблена структурна схема системи автоматичного управління положенням очісуючого пристрою та обрані її елементи. Проведений аналіз та синтез системи автоматичного управління, досліджена стійкість замкнутої системи та визначені запаси стійкості. Побудована бажана ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи та крива перехідного процесу. Визначені прямі показники якості синтезованої САР.

На основі одержаних результатів розроблена принципова схема мікропроцесорної системи автоматичного копіювання висоти стеблестою при очісуючому способі збирання рису.

Ключові слова: рисозбиральний комбайн, очісуючий пристрій, висота стеблестою, мікропроцесорна система.

Summary

on final qualification work of the student of group AK-23M-2 Dmytro Semenenko on a speciality 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics» on the theme: «Development and research of a system for automatic height adjustment of the rice harvester's haying device».

Master's thesis is devoted to the problem of upgrading of harvest of rice by a combing out method. By comparison to the traditional methods of collection of advantage of this method consist in that in the threshing machine of combine grain-growing part of biological harvest is given only as combing grain straw of lots that is characterized by high maintenance in him to grain-growing faction.

There are the considered progress of technology of collection of grain-crops a combing out method trends in a work. The conducted analysis of management object showed plenty of external indignations, that operate on a combing out device, and management possibilities by his position relatively stem. Worked out flow diagram of the system of automatic control by position of combing out device and her elements are select. The analysis and synthesis of automatic control system, the stability of the closed system and defined stability margins. We construct the desired LAFC open optimal system and the curve of the transition process. Define direct indicators of the quality of the synthesized ACS.

Based on these results, worked out schematic diagram of automatic control microsystem of stalks up height with the stripping method of harvesting rice.

Key words: rice harvester, haying device, stalk height, microprocessor system.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Сучасний стан технології і засобів автоматизації збирання рису очісуванням його на корені	6
1.1 Характеристика тенденцій розвитку зернозбиральної техніки	6
1.2 Аналіз засобів автоматизації збиральних процесів	10
1.3 Слідкуючі системи автоматичного керування технологічними процесами збирання зернових культур	16
2 Аналіз об'єкту управління та розробка структурної схеми системи автоматичного копіювання висоти стеблестою.....	27
2.1 Обґрунтування рівня глибини занурення ОП в стеблестій	27
2.2 Обґрунтування вимог до системи автоматичного копіювання висоти стеблестою і критеріїв якості її функціонування	30
2.3 Розробка структурної та функціональної схем системи автоматичного копіювання висоти стеблестою.....	35
3 Проектування системи автоматичного копіювання висоти стеблестою.....	39
3.1 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння	39
3.2 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи.....	39
3.3 Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості.....	42
3.4 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи.....	44
3.5 Побудова перехідного процесу замкнутої системи.....	45
3.6 Визначення прямих показників якості САР за графіком перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її аналізу та синтезу.....	46

3.7	Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї.....	47
3.8	Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР.....	49
3.9	Визначення прямих показників якості синтезованої САР.....	50
4	Практична реалізація системи автоматичного регулювання.....	51
4.1	Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора.....	51
4.2	Опис принципової схеми регулятора.....	52
	Висновки.....	63
	Список літератури.....	64
	Додаток А.....	67

Вступ

Актуальність даної теми обумовлена тим, що збирання зернових культур методом зрізу рослин на корені сьогодні вважається новим і перспективним напрямом розвитку зернозбиральної техніки, який отримав визнання як вітчизняних, так і зарубіжних фахівців.

На відміну від традиційних методів збирання, цей спосіб має низку переваг. Зокрема, у молотарку комбайна потрапляє лише зернова частина врожаю у вигляді обчесаного зерносоломистого вороху, який має високий вміст зерна (наприклад, при збиранні рису — до 85%). Незаповітрена частина врожаю, що залишилася у вигляді обчесаних стебел, скошується та збирається у валок без того, щоб проходити через молотарку.

Ці характеристики збирання рослин методом очісу на корені дозволяють збільшити продуктивність рисозбиральних комбайнів у 1,5 – 2,0 рази без підвищення їх металоємності та енерговитрат на виконання процесу збору врожаю. При цьому значно знижуються втрати та механічне пошкодження зерна робочими органами комбайна. Основним технологічним елементом такого комбайна є очісуючий пристрій (ОП), який здійснює очіс рослин на корені та забезпечує збір зерносоломистого вороху. Ефективність роботи всього комбайна залежить від якості його роботи.

Дослідження показали, що робочий діапазон швидкостей руху рисозбирального комбайна очісуючого типу складає від 1,0 до 2,5 м/с. Очісуючий пристрій, взаємодіючи з стеблестою, розділяє біологічний урожай рису на дві частини: зерносоломистий ворох, який становить 27 – 35 % від загального обсягу, і обчесані стебла, що складають приблизно 65 – 73 % від біологічного врожаю.

Основними агротехнічними показниками якості роботи очісуючого пристрою є втрати зерна та фракційний склад обчесаного вороху, які, головним чином, залежать від глибини занурення пристрою в стеблестій. Цей параметр визначається агробіологічними характеристиками культури, що

збирається, такими як висота стеблестою та ширина зони залягання колосся, які змінюються випадковим чином по довжині рядів комбайна в широких межах. Тому завдання стабілізації глибини занурення очісуючого пристрою в стеблестій набуло особливої важливості в новому технологічному процесі збирання.

Проте при високих робочих швидкостях комбайна ручне регулювання положення очісуючого пристрою щодо поверхні стеблестою з високою точністю стає практично неможливим. Тому розробка системи автоматичного копіювання поверхні стеблестою, яка забезпечувала б безперервну підтримку глибини занурення очісуючого пристрою на необхідному рівні з прийнятною точністю, є важливим завданням.

Метою даної роботи є покращення ефективності та стабільності роботи рисозбиральних комбайнів очісуючого типу шляхом забезпечення стабільної глибини занурення очісуючого пристрою в стеблестій на оптимальному рівні.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити характеристики зовнішніх умов, у яких працює очісуючий пристрій, як об'єкт автоматичного управління технологічним процесом.
2. Визначити вимоги до системи автоматичного регулювання (САР), критерії оптимізації її параметрів та показники якості її функціонування.
3. Обґрунтувати та розробити структурну й функціональну схему САР.
4. Оцінити ефективність і стійкість роботи рисозбирального комбайна очісуючого типу, оснащеного системою автоматичного копіювання поверхні стеблестою та управління глибиною занурення очісуючого пристрою.

Об'єктом дослідження є технологія та технічні засоби збирання рису методом очісування рослин на корені, характеристики очісуючого стеблестою, процес контролю поверхні стеблестою (ПС) і управління глибиною занурення очісуючого пристрою в стеблестій.

Предметом дослідження є система автоматичного регулювання висоти очісуючого пристрою рисозбирального комбайна.

Методи досліджень. У процесі вирішення поставлених завдань використовувалися методи теорії автоматичного управління, аналізу динамічних систем, класичні методи теорії ймовірностей і математичної статистики, кореляційно-регресійного аналізу, а також теорії випадкових функцій.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше було доведено доцільність застосування принципу копіювання поверхні стеблестою для автоматичного контролю та управління глибиною занурення очісуючого пристрою в процесі збирання рису та інших зернових культур методом очісування рослин на корені.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені в роботі схемотехнічні рішення, алгоритм управління положенням очісуючого пристрою та структурно-функціональна схема системи автоматичного копіювання поверхні стеблестою і управління положенням ОП дозволяють створювати конструкторську документацію для промислових зразків систем автоматичного контролю та регулювання глибини занурення очісуючого пристрою в стеблестій для високоефективних зернозбиральних комбайнів, заснованих на нових технологічних підходах до збирання рослин на корені.

Результати досліджень були представлені на Всеукраїнській науково-практичній онлайн-конференції «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві», яка відбулася 13-14 листопада 2024 року.

Основні результати досліджень викладені в одній науковій публікації.

1 Сучасний стан технології та обладнання для автоматизації процесу збирання рису методом очісування рослин на корені

1.1. Опис тенденцій у розвитку техніки для збирання зерна

Різноманітні дослідження, спрямовані на вдосконалення технологічного процесу та основних робочих елементів зернозбиральних комбайнів з традиційною схемою збирання, що передбачає попереднє скошування хлібної маси та її подальшу обробку в молотарці, показали, що екстенсивний підхід до розвитку зернозбиральної техніки практично вичерпав себе. Інтенсифікація технологічних процесів у таких комбайнах призвела до значного збільшення їх розмірів, зростання матеріальних і енергетичних витрат, але без належного зниження втрат зерна, покращення продуктивності та зменшення механічних ушкоджень зерна в бункері. Наприклад, при збиранні рису втрати зерна за комбайном можуть досягати 10-15%, а дроблення та обрушення зерна в бункері — 6-10%, тоді як продуктивність прямого комбайнування за зміну в середньому складає 1,5-2,0 га, а тривалість збирання може розтягуватись до 40-60 днів.

У середині 70-х років XX століття в СРСР був розроблений новий метод обмолоту зернових культур на корені, а також створені перші зразки очісуючих пристроїв (ОП), які встановлювались як хедер на рисозернозбиральні комбайни. Перші польові випробування підтвердили переваги та перспективність цього способу збирання, оскільки листостеблова маса не потрапляє в молотарку, а зерносоломистий ворох, отриманий при обробці рису на корені, має високий вміст зернової фракції (до 85%).

Макетні зразки рисозбиральних комбайнів очісуючого типу, розроблені спеціалістами МІМСГ (тепер ТГАТУ) на основі серійних комбайнів, успішно пройшли державні випробування у 1985 році (Кубниитим) та в 1987-88 роках (Кубниитим і Південно-Українська МДС). Це стало початком розвитку нової зернозбиральної техніки, що базується на інноваційній технології збирання.

Польові випробування показали, що використання технології збирання рису на корені дає змогу підвищити продуктивність рисозбиральних машин у 1,5-2,0 рази без збільшення їх матеріальних витрат і потужності силової установки. При цьому механічне ушкодження зерна очісуючими пристроями майже повністю виключене.

У першій половині 80-х років минулого століття подібні розробки почали з'являтися і на Захід, зокрема у Великобританії (компанії Shelbourne Reynolds та AFRC Engineering). На сьогоднішній день закордонні розробки дійшли до етапу серійного виробництва очісуючих адаптерів, які стали частиною світового ринку сільськогосподарської техніки. До цих інновацій проявили інтерес багато великих компаній-виробників комбайнів, таких як “Кейс-Інтернешнл Харвестер”, “Нью Холланд” та інші.

Водночас, за даними деяких вітчизняних і закордонних досліджень, застосування технології збирання зернових культур на корені стикається з рядом проблем, пов'язаних з необхідністю точно дотримання глибини занурення очісуючого пристрою в стеблестій. Цей параметр безпосередньо впливає на ефективність роботи як самого очісуючого пристрою, так і комбайна в цілому.

Актуальність цієї проблеми підтверджується численними дослідженнями, орієнтованими на розв'язання завдання оптимізації глибини занурення очісуючого пристрою в стеблестій та розробку технічних засобів для безперервного контролю й регулювання цього параметра залежно від висоти стеблестою.

Аналіз кореляційно-регресійних багаторічних експериментальних даних польових досліджень та випробувань макетних зразків очісуючого пристрою конструкції ТГАТУ показав наступне.

1. Для очісуючого пристрою барабанного типу спостерігається сильний негативний кореляційний зв'язок з вираженою нелінійністю (рис. 1.1) між рівнем втрат зерна та глибиною його занурення в стеблестій, при коефіцієнті кореляції в межах $r = - (0,86 \dots 0,98)$.

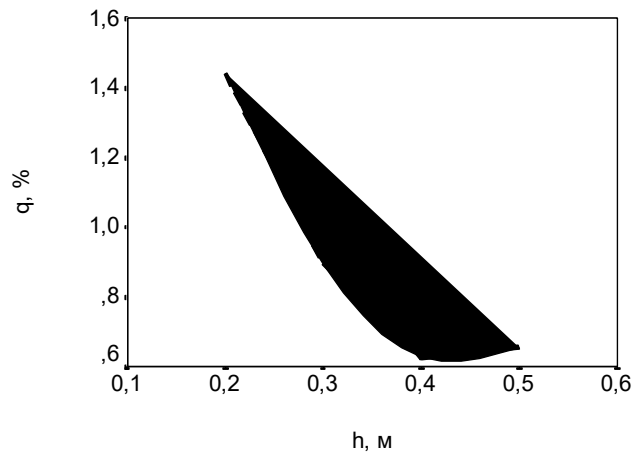


Рисунок 1.1 – Залежність втрат зерна рису від глибини занурення очісуючого пристрою

2. Фракційний склад обчесаного вороху має тісний кореляційний зв'язок із глибиною занурення очісуючого пристрою в стеблестій: соломиста фракція демонструє позитивну кореляцію ($r = 0,95 - 0,97$), тоді як частка вільного зерна (рис. 1.2) – негативну ($r = -0,76... - 0,85$).

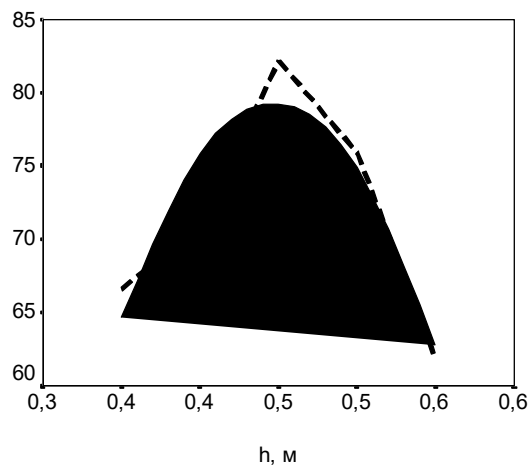


Рисунок 1.2 - Залежність відсотка вільного зерна в зерновій фракції рисового вороху від глибини занурення очісуючого пристрою в стеблестій

3. Секундна подача обчесаного вороху в молотарку комбайна має високу кореляцію ($r = 0,90 - 0,97$) з глибиною занурення очісуючого пристрою в стеблестій, незалежно від швидкості руху комбайна V_m (рис. 1.3).

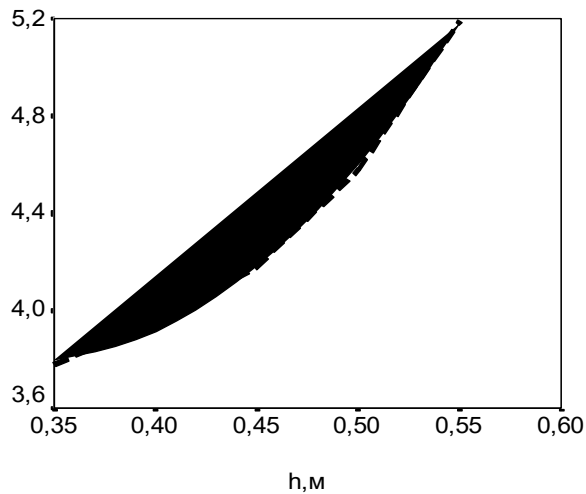


Рисунок 1.3 – Залежність секундної подачі обчесаного вороху рису в молотарку від глибини занурення очісуючого пристрою в стеблестій при швидкості руху комбайна $V_M = 1,5$ м/с.

4. Фракційний склад обчесаного вороху та секундна подача вороху в молотарку комбайна є найбільш важливими факторами, які впливають на ефективність сепарації вільного зерна та домолоту колосів, обірваних під час вичісування.

Результати багатфакторних досліджень процесу сепарації зерна в модернізованому молотильно-сепаруючому пристрої рисозбирального комбайна «Єнісей-1200Р» показали, що найбільший вплив на оптимізаційний параметр мали вміст вільного зерна в обчесаному вороху (позитивна кореляція), солонистість і величина секундної подачі вороху (негативні зв'язки). Частка впливу цих трьох факторів серед усіх досліджених одинадцяти становила майже 35,5%.

Отже, потреба в безперервному контролі та управлінні глибиною занурення очісуючого пристрою в стеблестій на оптимальному рівні зумовлена механіко-технологічними характеристиками процесу збирання зернових культур і рису методом очісування рослин на корені. Ручне регулювання глибини занурення при швидкостях руху комбайна від 1,0 до 2,5 м/с є практично неможливим. Тому створення системи автоматичного копіювання поверхні стеблестою, що забезпечує безперервну підтримку

глибини занурення очісуючого пристрою на потрібному рівні з необхідною точністю, є особливо актуальним завданням.

1.2. Огляд засобів автоматизації процесів збирання

Проблеми управління сільськогосподарськими машинами активно досліджувалися численними вченими у контексті впровадження автоматичних систем. Важливі основи в цій сфері заклали роботи А.Б. Лур'є та його наукової школи. Значний внесок у розвиток теоретичних і практичних аспектів управління сільськогосподарськими збиральними машинами зробили такі науковці, як С.О. Алфьоров, П.М. Василенко, Г.О. Гуляєв, Г.С. Іоффе, М.В. Киреев, В.А. Кубишев, І.І. Мартиненко, І.І. Наконечний, Г.Е. Чепурин, В.Д. Шеповалов та інші.

Усі процеси збирання у рослинництві здійснюються за допомогою мобільних агрегатів, і з точки зору автоматизації цих технологічних процесів можна виділити такі основні категорії систем:

1. Системи автоматичного управління рухом мобільних агрегатів.
2. Системи автоматичного регулювання положення робочих органів або самої машини.
3. Системи регулювання завантаження машини або окремих її робочих елементів.
4. Системи автоматичного контролю, сигналізації та захисту (моніторинг працездатності машини і її робочих органів, забезпечення правильності виконання технологічних процесів).
5. Системи централізованого контролю та управління (інтеграція функцій контролю та управління локальних систем у рамках автоматизованих систем управління виробництвом).

Щодо проблеми управління глибиною занурення очісуючого пристрою в стеблестій, система копіювання поверхні стеблестою за своїми

функціональними характеристиками відноситься до другого, третього та четвертого класів систем, зазначених вище.

У вітчизняних і закордонних дослідженнях значну увагу приділено системам автоматичного регулювання завантаження молотарок зернозбиральних комбайнів, ефективність роботи яких залежить від стабільності подачі хлібної маси. На молотарку впливає багато зовнішніх чинників, які змінюють навантаження її робочих органів. Зокрема, це коливання секундної подачі хлібної маси, що визначається урожайністю, висотою зрізу рослин, шириною захвата жниварки та швидкістю руху комбайна, а також змінні фізико-механічні та біологічні властивості культури, що збирається (вологість, солонистість, зрілість зерна тощо). Залежність завантаження молотарки від таких різних, випадкових за своєю природою факторів призводить до нестабільного режиму її роботи. Стабільність завантаження молотарки забезпечується переважно за рахунок регулювання швидкості руху комбайна або висоти зрізу рослин.

Для регулювання швидкості руху використовуються такі параметри, як крутний момент на валу молотильного барабана та товщина шару хлібної маси, зміна яких еквівалентна зміні подачі.

Встановлено, що регулювання за допомогою крутного моменту є більш складним і має затримку близько 1,25 секунди. Воно дозволяє враховувати не лише подачу, але й якісні характеристики хлібної маси, такі як вологість і засміченість. Регулювання за товщиною шару має меншу затримку, близько 0,75 секунди, і відображає тільки значення подачі. З часом на комбайнах почали використовувати удосконалені схеми автоматичного регулювання завантаження молотарки. Автоматичні регулятори завантаження молотарки, змінюючи швидкість руху комбайна, дозволяють знизити втрати зерна та підвищити продуктивність у середньому на 10–12% без змін в енергоспоживанні комбайна.

Ще одним параметром регулювання завантаження молотарки є висота зрізу рослин. Її стабільність у більшості випадків досягається за допомогою

пасивного механічного копіювання рельєфу поля ріжучим апаратом. Для цього жниварки оснащуються спеціальною системою навішування та обладнуються опорними башмаками або колесами, що повторюють контури поверхні. Для точного копіювання необхідно, щоб башмаки постійно контактували з ґрунтом, але не занурювалися в нього. Силою, що притискає жниварку до землі, є практично стабільна неврівноважена частина її ваги.

Проте було встановлено, що при збільшенні швидкості руху зернозбиральної машини контакт копіювальних башмаків із ґрунтом стає нерегулярним і перетворюється на випадкові удари, що призводить до підйому жниварки. Крім того, на слабонесучих ґрунтах спостерігалось занурення копіювальних башмаків у ґрунт, що призводило до захоплення землі жниваркою. Для усунення цих небажаних явищ були розроблені замкнені системи автоматичного регулювання висоти зрізу, приклади яких показані на рисунках 1.4 і 1.5.

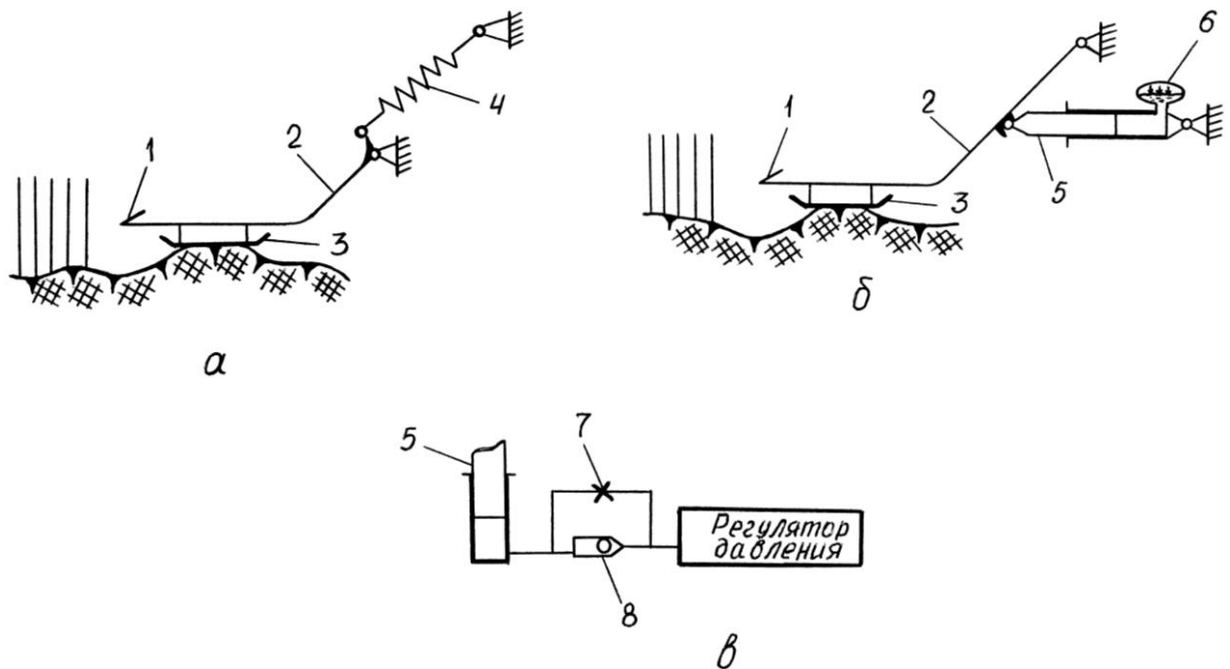


Рисунок 1.4 - Схема стабілізації висоти зрізу:

а – система механічного копіювання з пружинним зрівноваженням; б – система механічного копіювання з гідравлічним зрівноваженням; в – гідравлічна схема системи зрівноваження; 1 – ріжучий апарат; 2 – жниварка; 3 – опорний башмак; 4 – пружина для зрівноваження; 5 – шток гідроциліндра; 6 – гідравлічний акумулятор; 7 – гідравлічний опір; 8 – зворотний клапан.

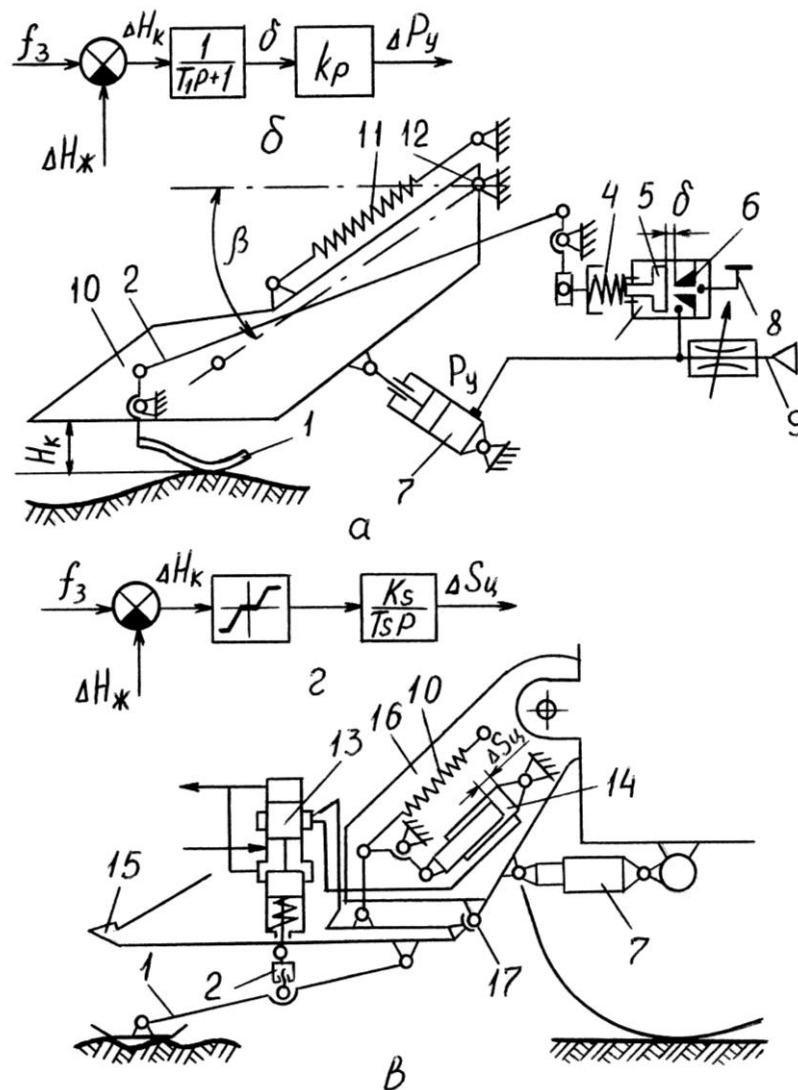


Рисунок 1.5 - Схеми замкнених систем автоматичного регулювання висоти зрізу (а, в – принципові; б, г – структурні схеми):

1 – контактний важіль; 2 – тяга; 3 – дроселюючий клапан; 4 – пружина стиснення; 5 – дроселюючий плунжер; 6 – сопло; 7 – гідроциліндр підйому жниварки; 8 – магістраль зливу; 9 – магістраль нагнітання; 10 – жниварка; 11 – компенсаційна пружина для врівноваження жниварки; 12 – шарнір підвісу жниварки; 13 – гідрозолотник; 14 – гідроциліндр підйому хедера; 15 – хедер; 16 – похила камера; 17 – кульовий шарнір.

Тут: $P_{\text{пит}}$ – тиск у магістралі нагнітання; $P_{\text{ц}}$ – тиск у сопловій камері (регулюючий вплив); δ – зазор між соплом і заслінкою; R_p – коефіцієнт пропорційності, ΔH_K – зміна вертикального положення опорної точки контактної важеля відносно дна жниварки; $\Delta H_{\text{ж}}$ – зміна відстані між поверхнею поля та дном жниварки через вертикальне переміщення дна жниварки у місці встановлення важеля, що копіює; $\Delta S_{\text{ц}}$ – переміщення штока гідроциліндра (регулюючий вплив); β – кут повороту жниварки відносно точки підвісу; f_3 – зміна відстані між поверхнею поля і дном жниварки, спричинена зміною рельєфу поля.

На жниварці встановлюються легкі підпружинені копіюючі важелі, які ковзають по поверхні ґрунту, підтримуючи постійний контакт з нею. Кут відхилення копіюючого важеля від заданого положення механічно або електрично перетворюється на зсув плунжера золотникового гідророзподільника, який є частиною гідроприводу, що відслідковує. Виконавчими елементами системи є гідроциліндри підйому жниварки. Потреба у виборі конструктивних параметрів таких систем з урахуванням обґрунтування призвела до створення математичних моделей їх роботи та розробки методів визначення оптимальних параметрів.

При використанні хедера очісуючого типу важливо, щоб його робоча зона копіювала профіль стеблестою, зокрема, зону розташування суцвіть, а не сам рельєф ґрунту.

Найближчим аналогом є позиційний регулятор висоти зрізу, встановлений на чаєзбиральній машині (рис. 1.6 і 1.7). Для того щоб зібрати чайний лист максимально ефективно, не завдаючи шкоди частинам рослини, що залишаються, робочі органи машини повинні бути точно орієнтовані відносно крон кущів. Для цього використовуються датчики 1 у вигляді легких дугоподібних пластин, які контактують з кронами та копіюють їхнє розташування під час руху машини вздовж ряду. Цей позиційний регулятор оснащений однокаскадним гідропідсилювачем зі струминною трубою.

За кордоном також робили спроби розробити подібні системи для автоматичного регулювання висоти хедера комбайна, призначеного для збирання певних не зернових культур. Кілька доповідей щодо конструкцій таких систем були представлені на симпозіумі IFAC, який відбувся в м. Саскачеван (Канада) у 1974 році, і був присвячений питанням автоматичного управління в сільському господарстві. Проте наявна інформація про ці розробки мала індикативний характер і не могла бути використана для створення систем автоматичного копіювання стеблестою для очісуючих пристроїв рисозернозбиральних комбайнів.

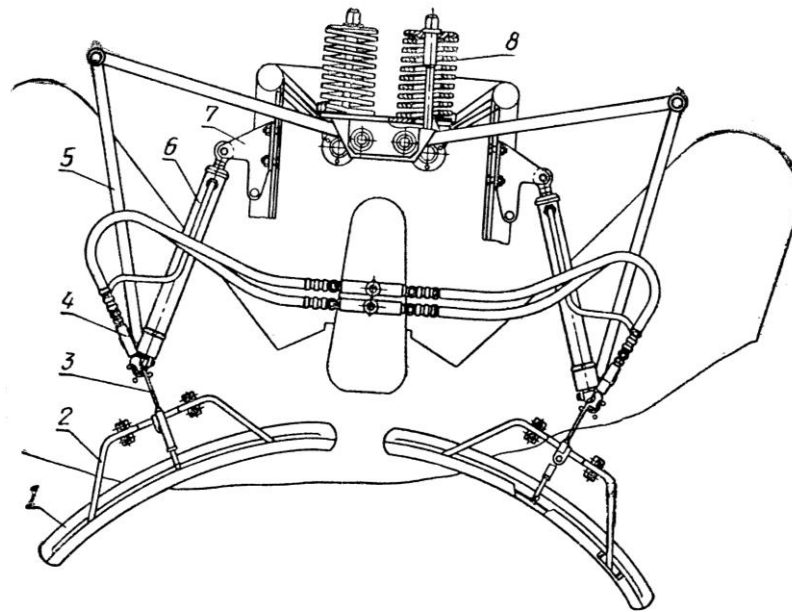


Рисунок 1.6 - Позиційний регулятор «Сакартвело»: 1 – датчик у вигляді пластини; 2 – важіль; 3 – тяга; 4 – розподільний пристрій; 5 – тяга; 6 – силовий циліндр; 7 – кронштейн; 8 – пружина.

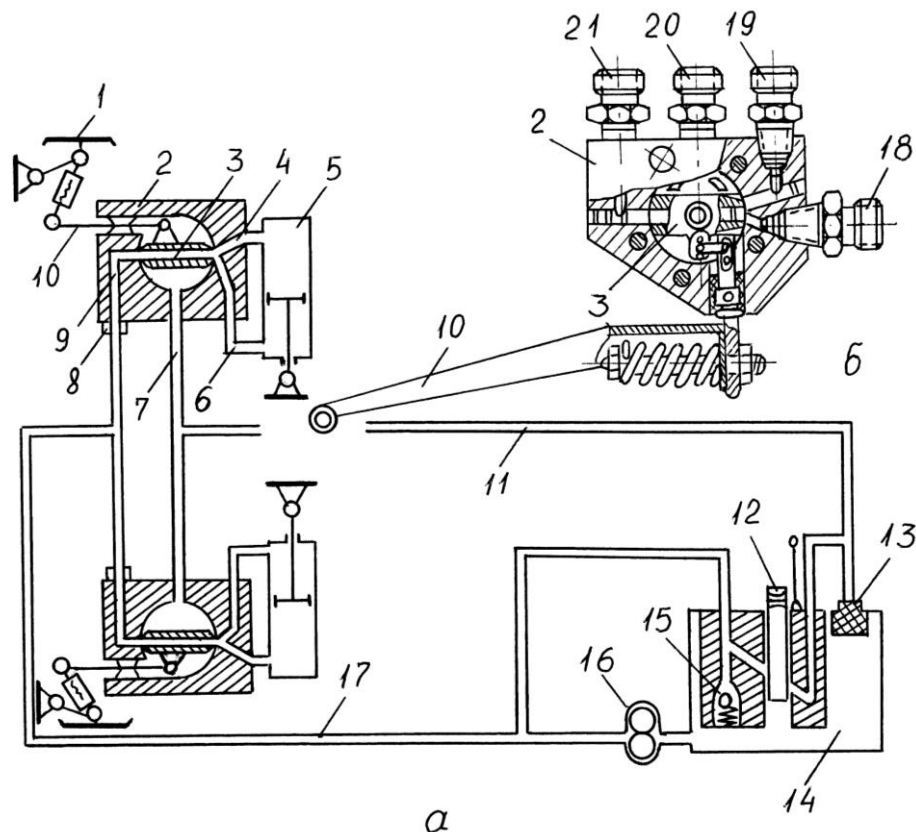


Рисунок 1.7 - Гідравлічна схема системи регулювання «Сакартвело»: а - гідравлічна схема; б - розподільний пристрій; 1 – датчик у вигляді пластини; 2 – корпус розподільника; 3 – струминна трубка; 4, 6, 7 і 9 – канали; 5 – силовий циліндр; 8 – дозуючий отвір; 10 – тяга; 11 – зливна магістраль; 12 – кран; 13 – фільтр; 14 – бак; 15 – переливний клапан; 16 – насос; 17 – нагнітальна магістраль; 18, 19, 20 і 21 – штуцери.

Важливо відзначити, що рівень та напрямки розвитку автоматизаційних систем сучасних зернозбиральних комбайнів зумовлені не лише потребами сільського господарства, а й фактичним рівнем наукових досліджень та конструкторських робіт у цій сфері, а також електронною компонентною базою, яку забезпечує електронна промисловість.

1.3. Системи автоматичного контролю технологічних процесів збирання зернових культур

Одним із перспективних напрямків розвитку систем автоматичного управління є створення слідкуючих систем, що підтверджується широким спектром теоретичних і практичних досліджень у цій сфері. Наукове та практичне значення цих досліджень зумовлене тим, що всі слідкуючі системи, як правило, мають нелінійну природу, що ускладнює їхній аналіз і проектування.

Гідропривід знайшов широке застосування в слідкуючих системах автоматичного управління завдяки своїм перевагам: високій швидкодії (постійна часу гідродвигуна значно менша за відповідну у електродвигуна завдяки малому ковзанню, низькому моменту інерції ротора гідромотора та високому тиску рідини); низькій питомій вазі гідромашини на одиницю потужності; стабільності швидкості при зміні навантаження (коефіцієнт ковзання в об'ємному гідроприводі у 20–30 разів менший, ніж у електродвигуна постійного струму); високому коефіцієнту підсилення потужності та відносно високому ККД. Принципова схема гідравлічного слідкуючого приводу з електричним зворотним зв'язком показана на рис. 1.8. У цій системі малопотужна електрична частина передає командні сигнали, а гідравлічний привід виконує функцію виконавчого пристрою.

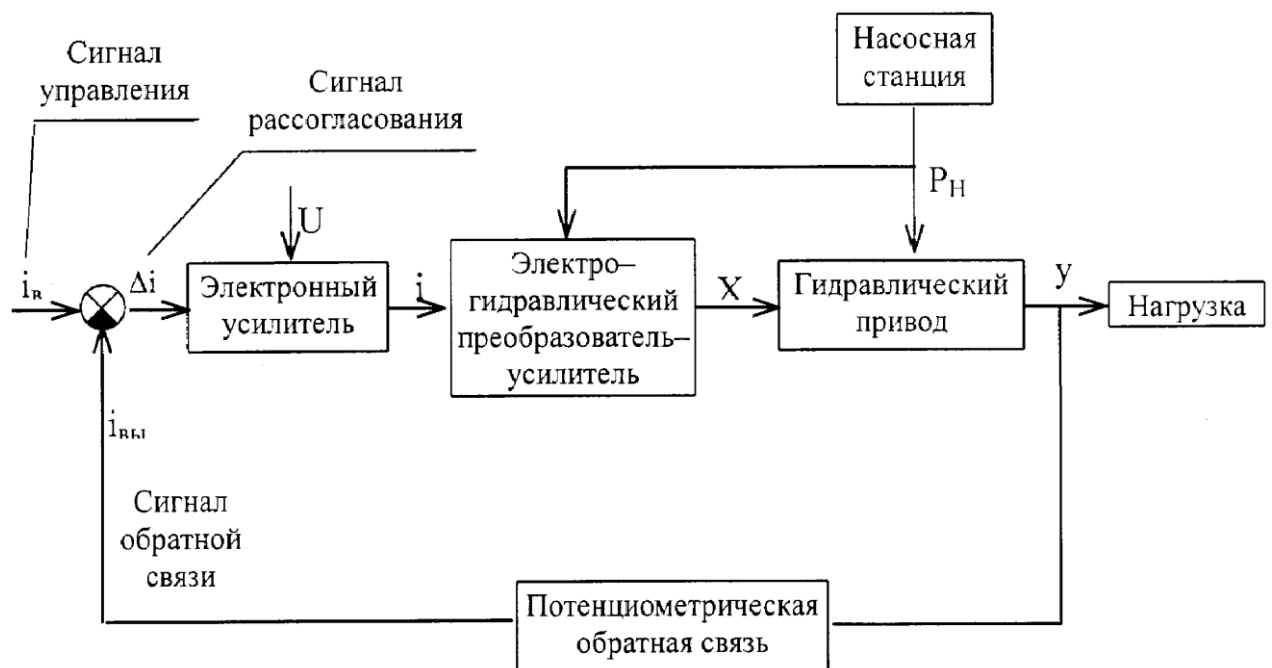


Рисунок 1.8 - Схема принципу роботи гідравлічного слідкувального приводу

Сигнал неузгодженості (див. рис. 1.8), який виникає при порівнянні сигналів струму керування та зворотного зв'язку, посилюється електронним підсилювачем і передається в електрогідравлічний перетворювач-підсилювач. У цьому пристрої електричний струм перетворюється в механічний сигнал, який, посилюючись у гідропідсилювачі, активує золотниковий механізм або механізм регулювання насоса виконавчого гідроприводу. Зворотний зв'язок у цьому системі синхронізує переміщення навантаження з сигналом керування.

Теоретичні та практичні дослідження показують, що гідравлічні слідкувочі приводи забезпечують оптимальне поєднання високої чутливості, потужності, точності та доброї якості перехідного процесу. Це робить їх беззаперечним вибором для потужних виконавчих пристроїв у системах керування. З цієї причини гідравлічні слідкувочі системи останнім часом набирають популярності та широко використовуються в сучасних сільськогосподарських машинах і агрегатах.

При розробці електрогідравлічних систем керування начипними пристроями мобільних сільськогосподарських машин основна увага зосереджується на підвищенні надійності, зручності обслуговування та розширенні функціональних можливостей. Крім того, необхідний

комплексний підхід до проектування та вибору параметрів гідравлічних, електричних і електронних компонентів цих систем. Автори запропонували науково обґрунтований метод проектування електрогідравлічних систем керування, який включає аналіз конструкції системних вузлів, експериментально-статистичне і математичне моделювання. Цей метод дозволяє знайти оптимальні параметри, які визначають характер динамічних процесів у гідравлічній навісній системі мобільної машини та відповідний закон переміщення навісного пристрою згідно з заданим критерієм. Розроблений алгоритм керування відображає особливості роботи технологічного агрегату і включає програмні рішення для покращення стійкості та якості управління. Надійність і довговічність вимірювальних каскадів забезпечується використанням індуктивних і магнітопружних перетворювачів для датчиків контролю регульованих параметрів. При виготовленні електронних плат для датчиків і мікропроцесорного блоку обробки сигналів застосовані компоненти та технології провідних світових виробників в області електроніки. У якості електро механічних перетворювачів використовуються електромагніти релейного і пропорційного типів або п'єзокерамічні актуатори.

Результати досліджень Скотникова А.В., що стосуються розробки автоматичної системи стабілізації глибини ходу ріжучих дисків жниварки томатозбирального комбайна, є науково-практичним інтересом. У своїй роботі автор проводить аналіз гідромеханічних автоматичних систем, які використовуються для регулювання положення робочих органів сільськогосподарських машин у вертикальній площині. Структурна схема розробленої автоматичної системи стабілізації представлена на рисунку 1.9.

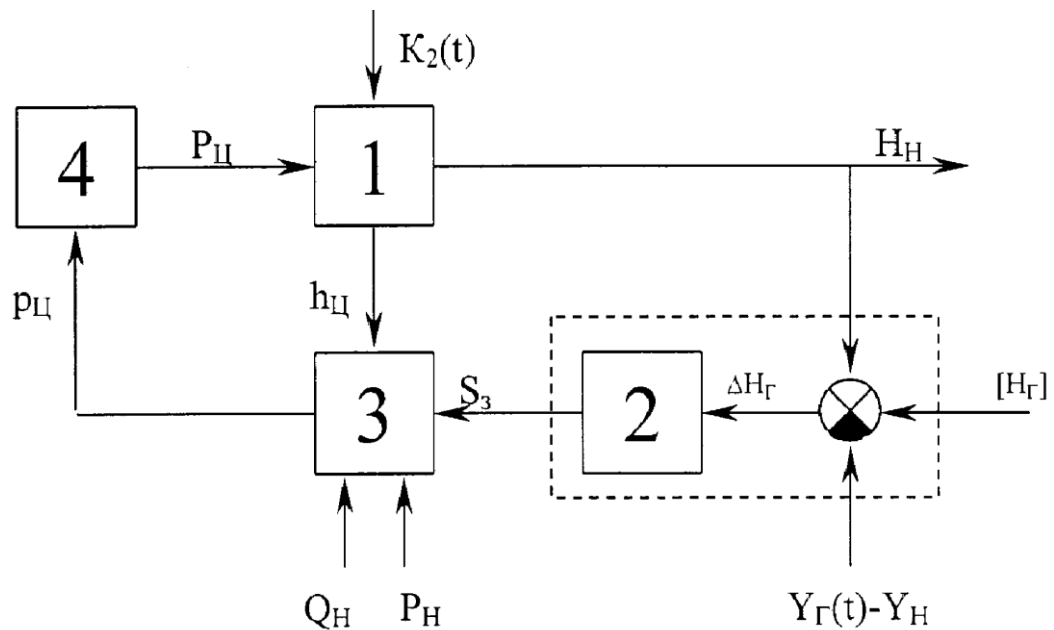


Рисунок 1.9 демонструє структурну схему автоматичної системи стабілізації, яка включає такі елементи:

1 – жниварка (об'єкт регулювання); 2 – датчик; 3 – гідророзподільник; 4 – гідроциліндр; H_H – відстань між нижньою кромкою дисків жниварки та дном міжряддя; $[H_H]$ – задана глибина ходу дисків відповідно до агротехнічних вимог; ΔH_G – похибка регулювання глибини ходу дисків; S_3 – переміщення плунжера; $Y_G(t) - Y_H$ – швидкість переміщення плунжера гідроциліндра; Q_H , P_H – відповідно продуктивність і тиск, що створюються насосом; $p_{ц}$, $P_{ц}$ – тиск у гідроциліндрі на вході та виході; K_3 – коефіцієнт підсилення золотника за витратою.

Математична модель вертикальних коливань жниварки 1 комбайна (рис. 1.9), яка є об'єктом регулювання, побудована на основі рівнянь Лагранжа другого роду у вигляді нелінійного диференціального рівняння другого порядку. Ця модель враховує багато факторів, зокрема регресійну залежність реакції на вплив сторін, що підрізають диски, та ґрунт.

Помилка регулювання ΔH_G є різницею, що представляє коливання глибини ходу підрізних дисків, спричинені впливом, що обурює, $Y_G(t)$ на датчик 2 та регулюючим впливом $P_{ц}(t)$ на жниварку комбайна з боку гідроциліндра 4, і визначається виразом [101].

$$\Delta H_G = H_H(t) + Y_H - Y_G(t) - [H_G], \quad (1.1)$$

де $H_H(t)$ – координата нижньої кромки дисків жниварки відносно дна міжряддя (результат регулюючого впливу $P_{ц}(t)$).

Y_H – координата диска жниварки у місці встановлення датчика 2 відносно його нижньої кромки – постійна величина, визначена кутом нахилу дисків.

$[H_{\Gamma}]$ – встановлена глибина ходу.

Датчик 2 є безінерційною ланкою з коефіцієнтом підсилення K_D :

$$S_3(t) = K_D \cdot \Delta H_{\Gamma} \quad (1.2)$$

Гідророзподільник 3 за виходами переміщення плунжера $S_3(t)$ і швидкості його переміщення $\dot{h}_y$, а також за тиском у гідроциліндрі $P_{ц}(t)$, представлений як нелінійна ланка, яка описується відповідним рівнянням:

$$P_y(t) = \begin{cases} \frac{F_{цo}}{F_{пл}}, & |S_3| \leq Z; \\ P_H - \left(\frac{\dot{h}_y \cdot F_{пл}}{K_3} \right)^2 \leq P_H, & S_3 < -Z; \\ \left(\frac{\dot{h}_y \cdot F_{пл}}{K_3} \right)^2 + P_{сл}, & S_3 > Z \end{cases} \quad (1.3)$$

де $F_{цo}$ – зусилля в циліндрі при $\dot{h}_y = 0$; $F_{пл}$ – площа плунжера гідроциліндра; Z – половина зони нечутливості гідророзподільника; P_H – тиск, що генерується насосом; $P_{сл}$ – тиск зливу, який створює фільтр; K_3 – коефіцієнт підсилення золотника за витратами, який розраховується за наступною формулою:

$$K_3 = f_{dp} \sqrt{\xi_{in}^2 \cdot \rho_M} \quad (1.4)$$

де f_{dp} – площа дросельного отвору; ξ_{in} – коефіцієнт опору дросельного отвору; ρ_M – густина масла.

Гідроциліндр 4, що має вхід $p_{ц}(t)$ і вихід $P_{ц}(t)$, є безінерційною ланкою, яка описується наступним рівнянням:

$$P_{ц}(t) = K_{ц} \cdot p_{ц}(t), \quad K_{ц} = F_{пл} \quad (1.5)$$

Автор використав систему рівнянь (1.1) – (1.5), яка описує рух елементів автоматичної системи стабілізації (АСС) глибини ходу, для створення цифрової моделі АСС та її аналізу з метою визначення оптимальних параметрів системи.

Зазначені дані підтверджують використання слідкуючих систем для стабілізації положення робочих органів сільськогосподарських збиральних машин відносно рельєфу ґрунту, що визначається копірами, які постійно контактують із його поверхнею. У випадку управління глибиною занурення робочих органів, поверхня ґрунту не може слугувати опорним сигналом, оскільки вона не надає інформації про висоту рослин та розташування суцвіть у стеблестой. Саме ці два параметри є ключовими для управління положенням робочих органів відносно стеблестою. Це і є принципова відмінність розробленої слідкуючої системи автоматичного управління від відомих систем, у яких загальною структурною ланкою є слідкуючий гідропривід, що виконує функцію виконавчого механізму.

Гідропривід автоматичних систем управління, як силовий динамічний елемент, має значний вплив на статику і динаміку слідкуючої системи. З методологічної точки зору особливу увагу заслуговує розрахунок параметрів для автоматичного регулювання завантаження молотарки комбайна. Це пояснюється тим, що параметри, такі як швидкість пересування комбайна, висота зрізу рослин і товщина стеблової маси в похилій камері комбайна, відображають лише кількість маси, що надходить у молотарку, але не її фізико-механічні властивості та агробіологічні характеристики, а також змінювані зовнішні умови, такі як урожайність, густина стеблестою, вологість, засміченість тощо.

До параметра регулювання завантаження зернозбирального комбайна висуваються наступні вимоги:

- параметр має відображати як якісні, так і кількісні характеристики процесу обмолоту хлібної маси;
- параметр повинен реагувати на зміни потужності, що використовується для привода ходової частини та робочих органів комбайна;
- транспортне запізнювання повинно бути мінімальним, щоб його вплив на точність автоматичного регулювання завантаження не був значущим;
- необхідно забезпечити високу точність, надійність та простоту конструкції пристрою для вимірювання параметра.

Найкраще ці вимоги задовольняє параметр регулювання – відхилення швидкості обертання молотильного барабана ($\Delta\omega_6$) від швидкості обертання холостого ходу, який добре відображає енергетичний аспект через двигун комбайна та характеризує якість технологічного процесу – втрати зерна за молотаркою. Транспортне запізнювання в отриманні інформації про $\Delta\omega_6$ від завантаження комбайна складає приблизно 1 секунду, що відповідає середньоквадратичній помилці автоматичного регулювання близько 2%. Висока надійність, точність і простота зняття інформації про $\Delta\omega_6$ досягається завдяки використанню індуктивного датчика частоти обертання молотильного барабана та застосуванню мікросхем у регуляторі, які забезпечують обробку інформації в цифровому форматі. Експериментальні дослідження показали, що продуктивність комбайна з таким регулятором на 12-15% вища порівняно з комбайном без нього (при однакових рівнях втрат зерна за молотаркою).

Розроблено узагальнений алгоритм оперативного автоматичного контролю за ефективністю роботи дозуючих пристроїв, які встановлені на мобільних машинах. Як показник якості вибрано середній ризик R , який є ймовірністю того, що контрольований процес $m_q(l)$ вийде за межі встановленого поля допуску

$$P\{|m_q(l) - q_{ln}| > \Delta_n\} = M\{e[m_q(l), q_{ln}]\}, \quad (1.6)$$

де q_{IH} – необхідне значення витрати матеріалу на одиницю шляху; $m_q(l)$ – середнє значення випадкового процесу $q(l)$ на інтервалі l_{ki} спостереження, яке обчислюється для кожного відрізка Δl шляху (крок дискретизації); Δ_H – агротехнічні вимоги у вигляді допуску на відхилення фактичної витрати $q(l)$ від заданої норми; $q_{IH}; M\{e[m_q(l), q_{l'}]\}$ – математичне очікування функції втрат, представленої у вигляді.

$$e[m_q(l), q_{l'}] = \begin{cases} 1, & |m_q(l) - q_{l'}| > \Delta_H; \\ 0, & |m_q(l) - q_{l'}| \leq \Delta_H. \end{cases} \quad (1.7)$$

Команда для піднастроювання дозуючого пристрою подається після того, як машина проходить певний відрізок шляху l_k . Це свідчить про те, що запропонований алгоритм орієнтований на дискретно-безперервне управління процесом $q(l)$.

Останнім часом активно досліджуються ефективні методи та засоби управління положенням очісуючих пристроїв щодо стеблестою у технології збирання зернових культур методом вичіски рослин на корені. Запропонована слідкуюча система автоматичного регулювання позиції переднього дефлектора очісуючого пристрою в залежності від висоти стеблестою (див. рис. 1.10).

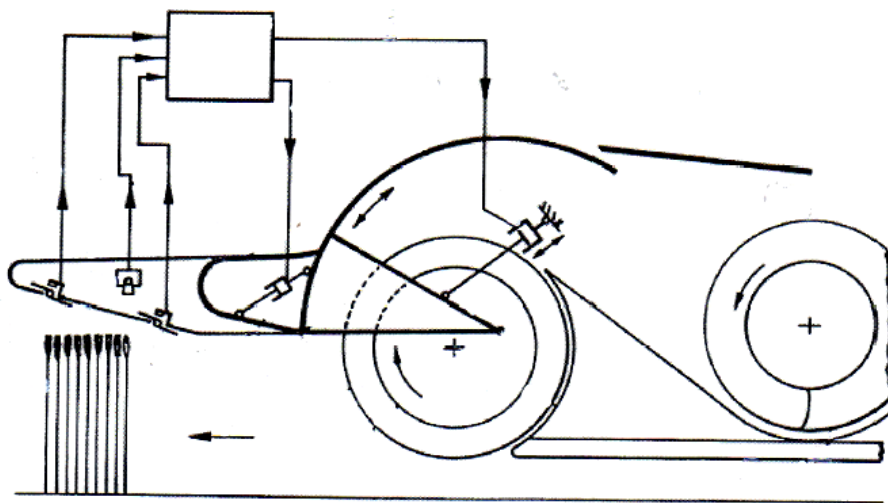


Рисунок 1.10 - Схема автоматичної слідкуючої системи управління дефлектором очісуючого пристрою відносно поверхні стеблестою

У цьому проєкті розглядається слідкуюча система, яка має забезпечувати безперервне відстеження об'єкта управління – очісуючим пристроєм – з кутовим положенням α_0 відносно корпусу комбайна відповідно до кута α_0 , що задається задаючим пристроєм, в залежності від поточного рівня висоти стеблестою, з певним допуском на похибку $\theta = \alpha_a - \alpha_i$ спостереження.

Для забезпечення високої точності спостереження потрібно використовувати інваріантні входи щодо керуючого та збурюючого впливів.

Особливістю задачі стабілізації глибини занурення очісуючого пристрою в стеблестій є випадковий характер зовнішніх збурюючих впливів, оскільки висота стеблестою на різних ділянках комбайна змінюється випадковим чином. Тому цю задачу слід розглядати як задачу оптимального керування $u(t)$ у класі кусочно-безперервних функцій, що забезпечує перехід системи з початкового фазового стану y_0 у кінцевий стан y_1 за мінімальний час при обмеженнях на керування (наприклад, обмеження потужності керуючих пристроїв).

Інтегральним критерієм якості такого керування є критерій максимальної швидкодії системи, який виник у теорії автоматичного керування як метод вибору параметрів, що забезпечують мінімальну тривалість перехідного процесу при обробці заданого вхідного сигналу (наприклад, "одиничної сходинок"). Окрім того, цікавий також і неінтегральний критерій якості, що має вигляд

$$I = \varphi(y(T)), \quad (1.8)$$

так званий критерій кінцевого стану, який застосовується, наприклад, у ситуаціях, коли потрібно забезпечити перехід системи в заданий кінцевий стан у момент часу T з мінімальною помилкою

$$\varphi(y(T)) = \sum_{i=1}^n [y_i(T) - a_i]^2 \Rightarrow \min \quad (1.9)$$

Окрім того, для розглянутого завдання цікаві критерії якості імовірнісного типу, що передбачають оптимальне управління системою за наявності випадкових збурень.

Особливістю умов роботи системи автоматичного керування положенням очісуючого пристрою відносно поверхні стеблестою (далі – система автоматичного копіювання – САК) є те, що механічна система твердих тіл, яка включає "корпус комбайна – очісуючий пристрій", виступає як коливальна динамічна система.

Під час польових досліджень було встановлено, що рисозернозбиральні комбайни, оснащені очісуючими пристроями, зазнають змінних зовнішніх впливів під час руху по полю, що призводить до вертикальних, тангажних і кренових коливань корпусу комбайна та очісуючого пристрою. Найбільший негативний вплив на процес вичіски рослин на корені мають вертикальні коливання – галопування комбайна, що було зафіксовано у протоколах Державних випробувань дослідних зразків рисозбиральних комбайнів з очісуючими пристроями. Це свідчить про те, що система автоматичного регулювання глибиною занурення очісуючого пристрою не повинна порушувати динамічну стійкість комбайна у вертикальній площині.

Слідкуючий гідропривід є частиною системи автоматичного керування глибиною занурення очісуючого пристрою (ОП) і може досягати стану насичення за витратами робочої рідини. Це обумовлює, що диференціальні рівняння, які описують роботу системи автоматичного керування (САК), стають нелінійними, і забезпечення глобальної стійкості системи відрізняється від забезпечення локальної стійкості рівноваги. При цьому навіть слідкуючий привід із не надто високою точністю без додаткових коригувальних контурів (заспокійливих входів) виявляється нестійким. Тому під час його розрахунку необхідно попередньо визначити числові характеристики цих входів.

Розроблено зручний критерій для аналізу наявності або відсутності автоколивальних режимів у класі нелінійних систем такого типу, що добре підходить для використання на ЕОМ. Цей критерій має простий аналітичний вигляд, на відміну від широко застосовуваних графоаналітичних методів, таких як метод логарифмічних частотних характеристик. Основою його побудови є гармонійна лінеаризація нелінійних складових системи.

Отже, проведений аналіз показав, що проблема управління глибиною занурення очісуючого пристрою шляхом автоматичного копіювання поверхні стеблестою є актуальною. Її вирішення має значне практичне значення для розробки та впровадження високоефективних технологій збору врожаю, а також створення нових типів рисозернозбиральних машин, що базуються на альтернативних методах збору рису та інших сільськогосподарських культур шляхом очісування рослин на корені.

2 Огляд об'єкта управління та створення структурної схеми системи автоматичного копіювання висоти стеблестою

2.1 Аргументація вибору рівня глибини занурення ОП у стеблестій

Багато досліджень роботи двобарабанного очісуючого пристрою (рис. 2.1) під час збирання рису показали, що глибина занурення ОП у стеблестій (h) має значний вплив на втрати зерна, складу зерносоломистого вороху та енерговитрати.

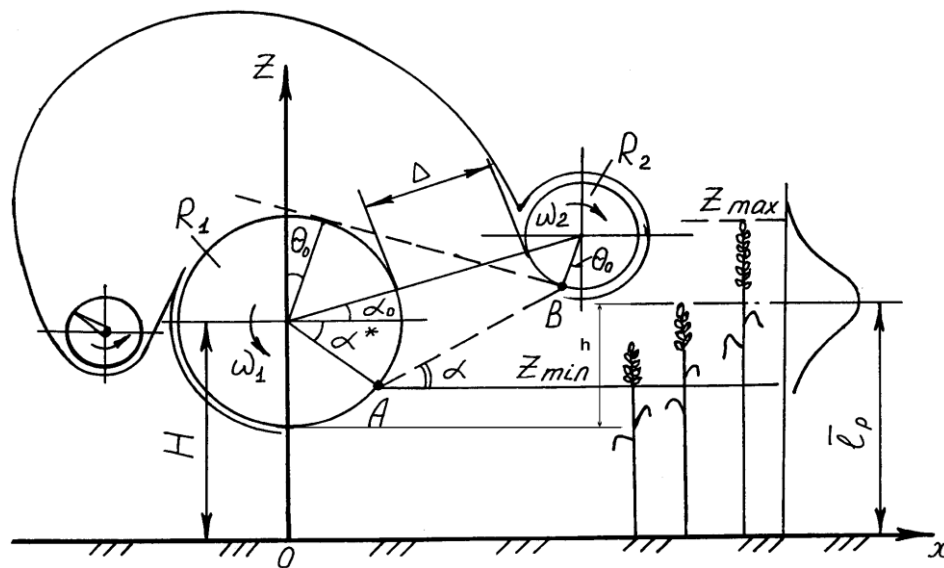


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення двобарабанного очісуючого пристрою

Цей пристрій представляє собою складну систему з численними вхідними та вихідними змінними (рис. 2.2). З одного боку, вона характеризується набором конструктивних параметрів, таких як радіуси очісуючого барабана R_1 і бітера-відбивача R_2 , відстань між їхніми поверхнями Δ у зоні очісування, кут нахилу площини, що проходить через осі барабанів, до горизонту α_0 , кутові координати кожухів, що охоплюють барабани, та інші. З іншого боку, система має регульовальні параметри, до яких відносяться швидкість комбайна V_M , кутові швидкості барабанів ω_1 і ω_2 , висота осі очісуючого барабана відносно поверхні ґрунту H тощо. Крім того, є вхідні параметри, що визначають зовнішні умови роботи пристрою, зокрема

урожайність U , висота рослин $\bar{l}_p$, густота стеблестою Γ , вологість зерна W_3 та інші. Вихідні змінні включають показники якості роботи очісуючого пристрою, такі як продуктивність Q , рівень втрат зерна q , енерговитрати E тощо.

У реальних умовах параметри агрофону в ймовірнісно-статистичному сенсі є випадковими величинами. Деякі з них змінюються в широких межах уздовж руху комбайна (урожайність, висота та густота стеблестою), тоді як інші коливаються у часі (вологість зерна та стебел).

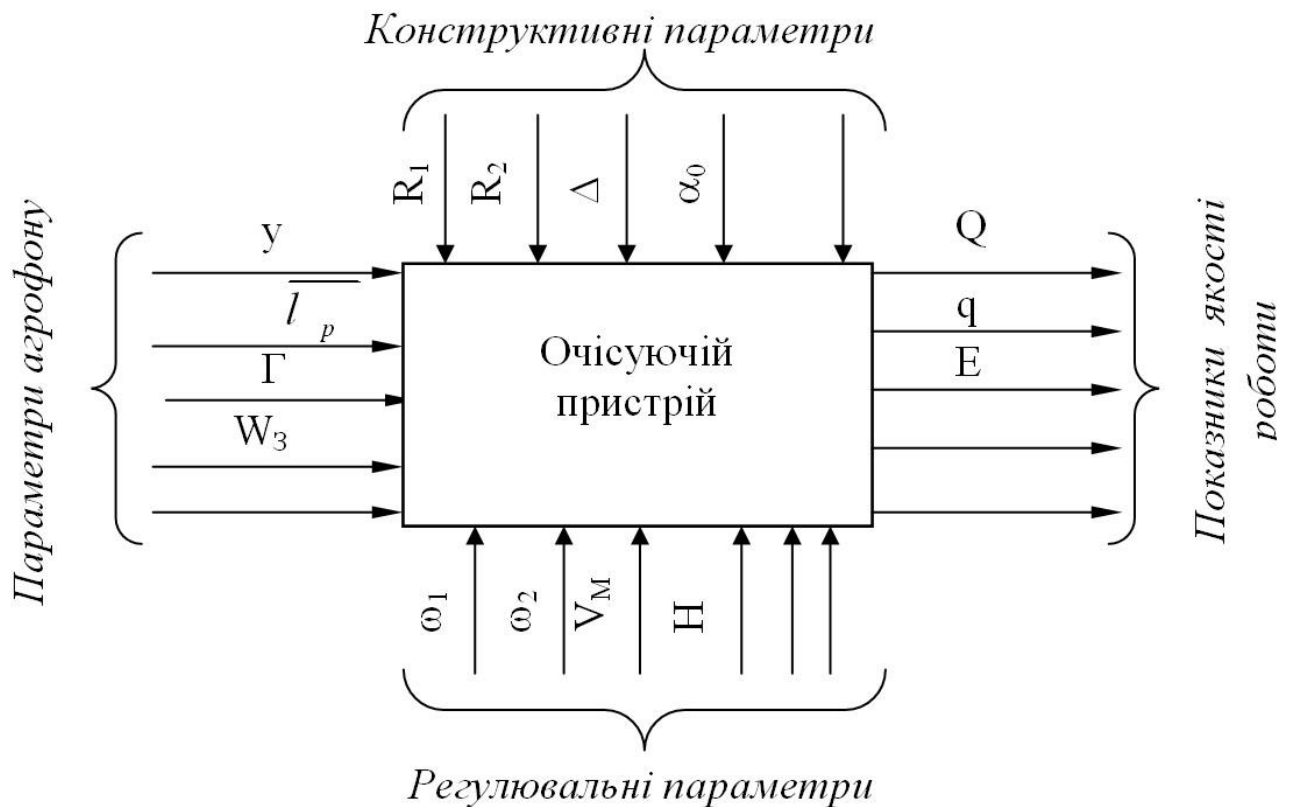


Рисунок 2.2 - Модель динаміки очісуючого пристрою

У цьому випадку регулювальний параметр h , який відповідає глибині занурення ОП у стеблестій, обчислюється за допомогою формули

$$h = \bar{l}_p - H + R_1, \quad (2.1)$$

Глибина занурення $\bar{l}_p$ залежить від випадкової величини, яка характеризує висоту стеблестою L_2 (рис. 2.1). Для “ідеального” стеблестою, що стоїть прямо, виконується рівність $\bar{l}_p = \bar{L}_2$. У цьому випадку нижню (Z_{min}) і верхню

(Z_{max}) межі розташування колосів у "ідеальному" стеблестой можна виразити за допомогою наступних співвідношень:

$$\begin{cases} Z_{min} = \bar{l}_p - \bar{l}_M - t \cdot (\sigma_p - \sigma_M); \\ Z_{max} = \bar{l}_p + t \cdot \sigma_p, \end{cases} \quad (2.2)$$

де $\bar{l}_p$, $\bar{l}_M$ – середня довжина рослин і колосків рису відповідно; σ_p , σ_M – середньоквадратичні відхилення випадкових величин lp і lm ; t – параметр, що визначається рівнем статистичної надійності (квантиль розподілу Стюдента).

З рисунка 2.1 випливає, що висота H осі очісуючого барабана повинна відповідати такій нерівності:

$$R_l < H < R_l + Z_{min} \quad (2.3)$$

З урахуванням рівнянь (2.1) та (2.2), на основі (2.3) можна отримати

$$\bar{l}_M + t \cdot (\sigma_p - \sigma_M) < h < \bar{l}_p \quad (2.4)$$

Отже, мінімально допустиме значення параметра h обчислюється за допомогою виразу:

$$h_{min} = \bar{l}_M + t \cdot (\sigma_p - \sigma_M) \quad (2.5)$$

Для рівня статистичної надійності $p = 0,95$ значення параметра t дорівнює 1,96, що означає, що

$$h_{min} = \bar{l}_M + 1,96 \cdot (\sigma_p - \sigma_M) \quad (2.6)$$

Наприклад, для сорту рису "Краснодарський 424" за допомогою формули (2.6) розрахуємо мінімальне значення h_{min} , яке становить 32 см.

Для статистичної надійності $p = 0,997$ значення параметра t дорівнює 3, тому

$$h_{min} = \bar{l}_M + 3 \cdot (\sigma_p - \sigma_M) \quad (2.7)$$

Отже, для зазначеного сорту рису h_{min} становить 39 см при статистичній надійності $p = 0,997$. Іншими словами, мінімально допустиме значення глибини занурення ОП у стеблестій для сорту рису "Краснодарський 424" можна практично прийняти як $h_{min} = 40$ см на основі формули (2.7).

Сформулюємо задачу оптимізації параметра h , орієнтуючись на наступні три критерії: – мінімізацію втрат зерна через невичіску та осипання на поверхню поля; – зменшення частки соломистої фракції у складі зерносоломистого вороху, отриманого після вичіски; – мінімізацію енерговитрат, необхідних для очісування рослин стеблестою.

З урахуванням зазначених критеріїв, значення параметра h має відповідати умові, за якою ширина оброблюваної зони стеблестою повинна збігатися із шириною зони залягання колосків.

2.2 Підстави для визначення вимог до системи автоматичного копіювання висоти стеблестою та критерії якості її роботи

З точки зору методології системного аналізу та системотехніки, рисозбиральний комбайн очісуючого типу, як технічна система (див. рис. 2.3), є стабільною, цілісною, просторово організованою сукупністю елементів, кожен з яких має властивості, що підтримують виконання певних функцій. Ці елементи взаємодіють між собою через надійні зв'язки, що забезпечують досягнення загальної мети системи.

Очевидно, що очісуючий пристрій (ОП) є ключовим елементом розглянутої технічної системи (див. рис. 2.3), який виконує специфічні функції: очісування рослин на корені, збір зерносоломистого вороху та його подачу до молотарки комбайна для подальшої обробки. Цей елемент розділяє біологічний урожай на дві частини: зернову у вигляді зерносоломистого вороху і незернову у вигляді обчесаних стебел. ОП безпосередньо взаємодіє з іншими компонентами системи, зокрема, з сепаруючим пристроєм (2), що виділяє вільне зерно з вороху, ріжучим апаратом (7), який забезпечує скошування стебел, а також із силовою установкою і

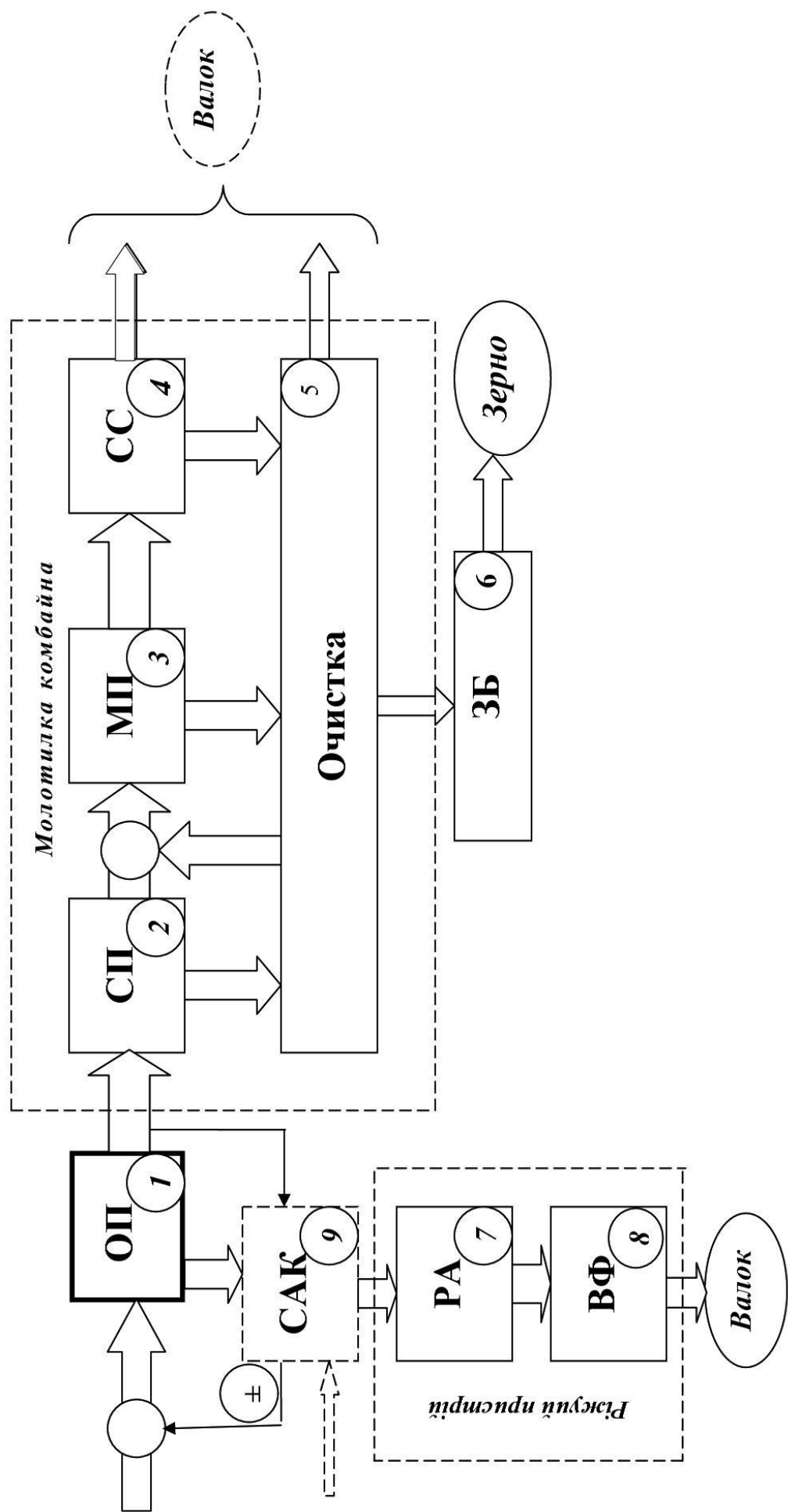


Рисунок 2.3 – Структурна схема рисозбирального комбайну очісуючого типу

двигуном комбайна. ОП також опосередковано взаємодіє з іншими технологічними елементами, такими як молотильний пристрій (3), соломосепаратор (4), системи очищення (5), іншими частинами молотарки комбайна та валкоутворювачем (8) ріжучого пристрою. Зв'язки, які забезпечують взаємодію ОП з іншими елементами комбайна, характеризуються енергетичним і матеріальним обміном, а також з зовнішнім середовищем (агрофоном).

Система автоматичного управління положенням ОП (САУ ПОП) (9) є елементом другого рівня відносно самого ОП, і її властивості спрямовані на забезпечення стабільності глибини занурення ОП у стеблестій на заданому рівні.

Необхідність виконання цієї функції САУ ПОП зумовлена тим, що стійкість і ефективність роботи ОП та комбайна загалом значною мірою залежать від глибини занурення ОП у стеблестій.

Зовнішні умови функціонування САУ ПОП визначаються біометричними та агробіологічними характеристиками стеблестою, а також конструктивно-технологічними особливостями ОП. Динамічні властивості системи автоматичного копіювання стеблестою також залежать від швидкості комбайна, яка варіюється в межах $0,5 \dots 2,5$ м/с.

Аналіз зовнішнього впливу на САУ показує, що на відрізку шляху комбайна довжиною 2,5 м цей вплив є досить нерегулярним, і різкі зміни типу "сходінка" можна вважати характерними для нього.

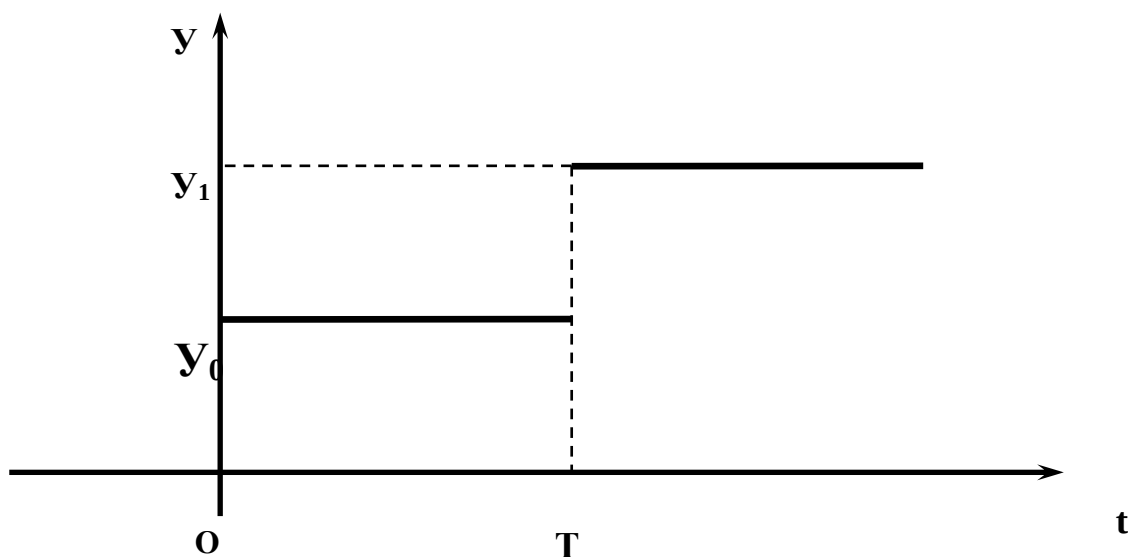


Рисунок 2.4 – Типова форма стрибків вхідного сигналу системи копіювання

Одним із головних критеріїв якості роботи САУ є її швидкодія, тобто час, за який система реагує на стрибкоподібний вхідний сигнал типу "сходінка" (рис. 2.4), причому ця реакція повинна завершуватись до початку наступного стрибка.

З фізичної точки зору це означає, що максимальна швидкість реагування досягається, коли система управління забезпечує швидкий розгін «двигуна» до високої швидкості, а потім різке гальмування. У теорії слідкуючих автоматичних систем управління цей критерій є основою для вибору параметрів, які забезпечують найкоротший перехідний процес при обробці заданого вхідного сигналу. У теорії оптимального управління цей критерій отримав більш загальне пояснення: метою є переведення системи з початкового фазового стану $V(t_0)=V_0$ у кінцевий заданий фазовий стан $V(T)=V_1$ за мінімальний час при обмежених управліннях $U(t)$. У контексті цієї задачі оптимальне управління полягає в знаходженні такого $U(t)$, при якому величина $T \Rightarrow \min$ буде мінімальною. При цьому значення критерію якості управління (T) залежить як від управління $U(t)$, так і від динаміки об'єкта управління – ОП.

Очевидно, що точність позиціонування ОП в будь-який момент часу залежить від повноти та достовірності даних про висоту стеблестою. Інформацію про випадкову функцію $Y_{\text{зад}}(t)$ можна отримати за допомогою датчиків, наприклад, п'єзоелектричних сенсорів, розташованих по ширині захвату ОП у кількох точках. Тому забезпечення процесу управління статистично надійною інформацією про висоту стеблестою, включаючи методи її отримання, перетворення, кодування, передачі та захисту від перешкод, є окремою групою завдань.

Для управління положенням ОП відносно поверхні стеблестою доцільно використовувати дискретні сигнали $Z(t)$, які квантуються за часом і отримуються у перетвореному вигляді від кожного датчика. Квантування безперервного сигналу $Z(t)$ за часом полягає у заміні великої кількості значень безперервного сигналу кінцевим числом миттєвих значень, що фіксуються

через певні інтервали часу τ .

У цьому завданні можна припустити, що рух комбайна є рівномірним, а крок квантування τ залишається постійним. Це значно спрощує подальше кодування сигналів та виконання логічних операцій з ними. Оскільки датчики поверхні стеблестою п'єзоелектричного типу генерують не безперервні, а імпульсні сигнали, найкраще застосовувати їх частотне модуляційне кодування, що також полегшує подальшу обробку.

Датчики перетворюють виміряну величину (висоту стеблестою) в електричний сигнал, який потім підсилюється, обробляється та подається на вхід електрогідравлічного слідкуючого приводу. Виконавчий елемент цього приводу складається з двох гідроциліндрів, які працюють паралельно для підйому-опускання ОП і шарнірно прикріплені до корпусу комбайна. Це означає, що обмеження у використанні управління зумовлені потужністю, необхідною для роботи САУ, яка визначається потужністю насоса, що підтримує тиск у гідросистемі. Коли споживана потужність досягає максимально можливого рівня, гідропривід переходить у режим насичення за витратою робочої рідини, що повинно бути враховане у рівняннях, що описують роботу системи.

Основними критеріями ефективності функціонування системи автоматичного копіювання є:

- швидкість роботи (мінімальний час реакції системи на вхідний сигнал);
- точність позиціонування (положення ОП щодо висоти стеблестою повинно відповідати агротехнічним допускам);
- амплітудно-частотні характеристики впливів САУ повинні відповідати вимогам динамічної стійкості комбайна у вертикальній площині (відсутність автоколивальних режимів, що спричиняють галопування комбайна);
- мінімальні питомі енерговитрати на корекцію положення ОП (або економічно обґрунтовані витрати).

2.3 Створення структурної та функціональної схеми системи автоматичного копіювання висоти стеблестою

Для реалізації такого слідкуючого управління оптимальним варіантом є система автоматичного управління на основі електрогідравлічного слідкуючого привода, який добре досліджений і широко використовується в різних технічних системах. На рис. 2.5 показана функціональна схема системи автоматичного копіювання висоти стеблестою, яка забезпечує контроль і управління глибиною занурення ОП у стеблестій залежно від змін поверхні стеблестою.

З рисунка 2.5 видно, що положення ОП відносно корпусу комбайна визначається кутовою координатою φ , яка змінюється залежно від висоти стеблестою, що вимірюється датчиками (1), та необхідної для оброблюваної культури глибини занурення (h). Це регулювання здійснюється за допомогою гідроциліндрів (4), які виконують функції виконавчих елементів у складі електрогідропривода системи автоматичного копіювання.

Контроль і управління положенням ОП щодо поверхні стеблестою за допомогою такої системи відбувається в такий спосіб. На вхід слідкуючого електрогідропривода, а саме на золотниковий електрогідророзподільувач (3), подається відповідний управляючий вплив $U(z)$, який визначається згідно з законом управління у пристрої (2) формування управляючого сигналу на підставі обробки сигналів, що надходять від блоку датчиків висоти стеблестою (1). Такий пристрій може бути створений на базі сучасної мікропроцесорної техніки.

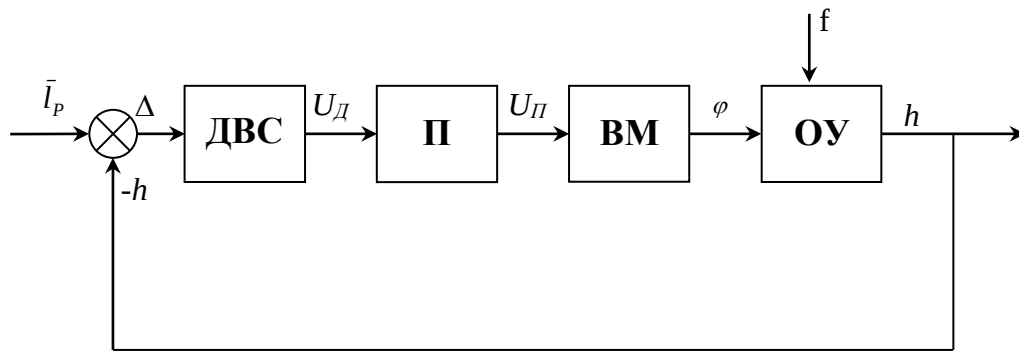


Рисунок 2.6 – Структурна схема системи автоматичного копіювання поверхні стеблестою

На основі аналізу різних типів датчиків (вимірювальних перетворювачів), принципів їх роботи, фізичних характеристик сигналів, які вони генерують, а також особливостей вимірюваної величини (випадкові зміни висоти стеблестою по довжині гонів комбайна) і специфічних польових умов (запиленість, висока вологість хлібостою та ґрунту тощо), ми вибрали два основних типи датчиків. Це поплавкові перетворювачі, які в даному випадку реагують на висоту стеблестою завдяки «виштовхуючій» силі середовища, та п'єзоелектричні перетворювачі, які відповідають на імпульсні механічні впливи від суцвіть рослин.

Обидва типи цих вимірювальних перетворювачів здатні перетворювати вхідну механічну величину в електричний сигнал, який зручно використовувати в системі управління. Крім того, п'єзоелектричні датчики добре підходять для вимірювання параметрів, які змінюються швидко в часі. Однак через низький рівень вихідної напруги п'єзoeлемента в вимірювальних пристроях зазвичай використовують електронний підсилювач.

У системі автоматичного управління положенням очісуючого пристрою (рис. 2.6) застосовується принцип управління за відхиленням, що означає формування керуючого впливу лише тоді, коли керована величина відхиляється від заданого значення. З цієї причини слідкуючий електрогідропривід системи автоматичного управління, що реалізує потрібний

вплив, повинен бути оснащений негативним зворотним зв'язком. Тобто при підвищенні висоти стеблестою кутова координата φ збільшується (очісуючий пристрій піднімається), а при зменшенні висоти стеблестою кутова координата φ має зменшуватися (очісуючий пристрій опускається).

Аналіз літературних джерел дозволив визначити передаточні функції складових елементів системи:

- об'єкта управління

$$W_{OK}(p) = \frac{k_0}{p(T_0 p + 1)}; \quad (2.8)$$

- виконавчого механізму

$$W_{BM}(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; \quad (2.9)$$

- підсилювача

$$W_{II}(p) = k_2; \quad (2.10)$$

- датчика висоти стеблестою

$$W_{DBC}(p) = 1. \quad (2.11)$$

Параметри цих передаточних функцій мають такі значення

$$k_0 = 0,18 \text{ м/рад}; k_1 = 2,2 \text{ рад/В}; k_2 = 18; T_0 = 4,2 \text{ с}; T_1 = 0,05 \text{ с}. \quad (2.12)$$

3 Розробка системи автоматичного копіювання висоти стеблестою

3.1 Знаходження передаточних функцій розімкненої та замкнутої системи, а також характеристичного рівняння

Оскільки елементи структурної схеми САР розташовані послідовно, для отримання передаточної функції розімкненої системи необхідно перемножити передаточні функції всіх складових елементів:

$$W_p(p) = W_{OK}(p) \cdot W_{BM}(p) \cdot W_{II}(p) \cdot W_{DT}(p) = \frac{k_0 k_1 k_2}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)} \cdot \quad (3.1)$$

Для зручності запису введемо позначення:

$$k = k_0 k_1 k_2. \quad (3.2)$$

У цьому випадку передаточна функція розімкнутої системи матиме такий вигляд:

$$W_p(p) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (3.3)$$

Передаточна функція замкнутої системи, враховуючи, що $W_{zz}(p) = 1$, обчислюється за наступною формулою

$$W_z(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) + k}. \quad (3.4)$$

Характеристичне рівняння набирає наступного вигляду:

$$\begin{aligned} T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k &= 0, \\ 0,21 p^3 + 4,25 p^2 + p + 7,128 &= 0. \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.2 Конструювання амплітудно-частотної характеристики (АФЧХ), фазо-частотної характеристики (ЛАЧХ) та логарифмічної фазо-частотної характеристики (ЛФЧХ) розімкнутої системи

3.2.1 Конструювання амплітудно-частотної характеристики (АФЧХ) розімкнутої системи.

Щоб побудувати амплітудно-фазову частотну характеристику розімкнутої системи, слід у відповідній передаточній функції замінити змінну $p = j\omega$ на ($j = \sqrt{-1}$, ω – частота), виділити дійсну частину $P(\omega)$ і уявну частину $Q(\omega)$, а потім, змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкладати відповідні значення:

$$\begin{aligned} W_p(j\omega) &= \frac{k}{j\omega(T_1 j\omega + 1)(T_0 j\omega + 1)} = \frac{k}{T_1 T_0 (j\omega)^3 + (T_1 + T_0)(j\omega)^2 + j\omega} = \\ &= \frac{k}{-jT_1 T_0 \omega^3 - (T_1 + T_0)\omega^2 + j\omega} = \frac{k}{-(T_1 + T_0)\omega^2 + j(\omega - T_1 T_0 \omega^3)} = \\ &= \frac{k(-(T_1 + T_0)\omega^2 - j(\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(-(T_1 + T_0)\omega^2)^2 + ((\omega - T_1 T_0 \omega^3))^2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Таким чином, підставивши значення коефіцієнтів та сталих часу, ми отримаємо:

$$P(\omega) = \frac{k(-(T_1 + T_0)\omega^2)}{(-(T_1 + T_0)\omega^2)^2 + ((\omega - T_1 T_0 \omega^3))^2} = \frac{7,128(-4,25\omega^2)}{(-4,25\omega^2)^2 + (\omega - 0,21 \cdot \omega^3)^2}; \quad (3.7)$$



Рисунок 3.1 – Амплітудно-фазова частотна характеристика розімкнутої системи

$$Q(\omega) = \frac{k(-(\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(-(T_1 + T_0)\omega^2)^2 + ((\omega - T_1 T_0 \omega^3))^2} = \frac{7,128(-(\omega - 0,21 \cdot \omega^3))}{(-4,25\omega^2)^2 + (\omega - 0,21 \cdot \omega^3)^2}. \quad (3.8)$$

3.2.2 Складання логарифмічно-амплітудної частотної характеристики розімкнутої системи.

Для побудови логарифмічно-амплітудної частотної характеристики за допомогою асимптотичного методу спочатку необхідно визначити спрягаючі частоти, використовуючи значення сталих часу динамічних елементів системи:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{4,2} = 0,24 \text{ с}^{-1}, \text{ відноситься до аперіодичної ланки};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,05} = 20 \text{ с}^{-1}, \text{ відноситься до аперіодичної ланки}.$$

Знайдені спрягаючі частоти позначаємо на осі частот у логарифмічному масштабі. Низькочастотна асимптота ЛАЧХ $\omega < \omega_0$ є прямою з нахилом -20 дБ/дек, оскільки система має інтегруючу динамічну ланку. Ця пряма, або її продовження при $\omega = 1$, повинна перетинати ординату на рівні $20 \lg k = 17,06$ дБ (де $k = 7,128$ – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи)

Після кожної з спрягаючих частот нахил характеристики $L(\omega)$ зменшується на -20 дБ/дек, оскільки ці частоти відповідають аперіодичним

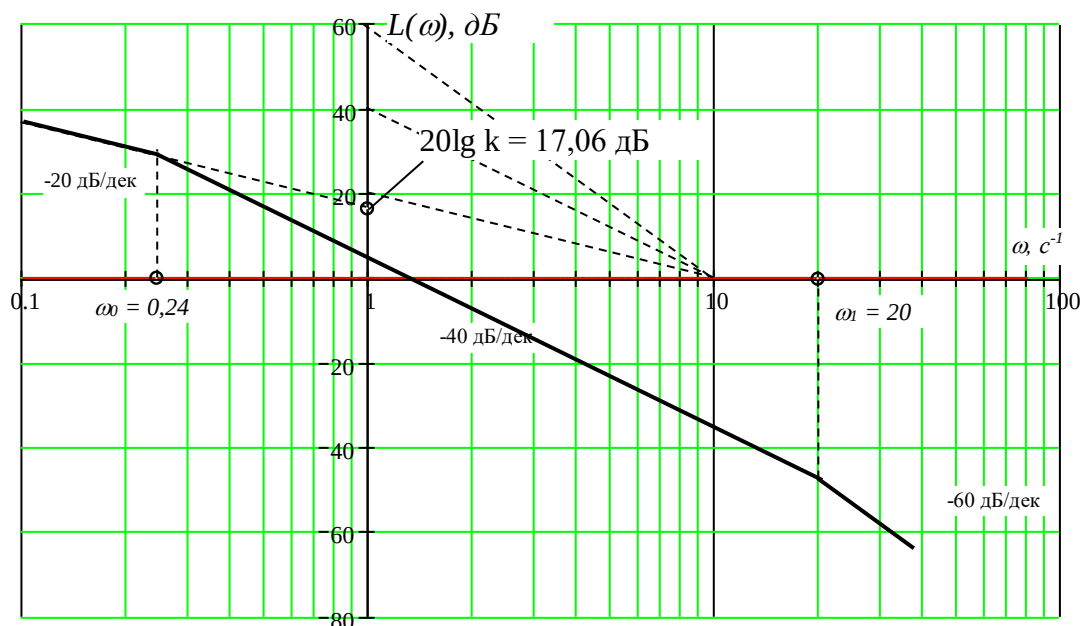


Рисунок 3.2 – Логарифмічно-амплітудна частотна характеристика розімкнутої системи $L(\omega)$

динамічним ланкам першого порядку. Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто її частина при частотах, що перевищують ω_1 , має нахил -60 дБ/дек.

3.2.3 Створення фазової частотної характеристики розімкнутої системи.

Фазова частотна характеристика одноконтурної розімкнутої системи отримується шляхом додавання фазових характеристик окремих елементів системи

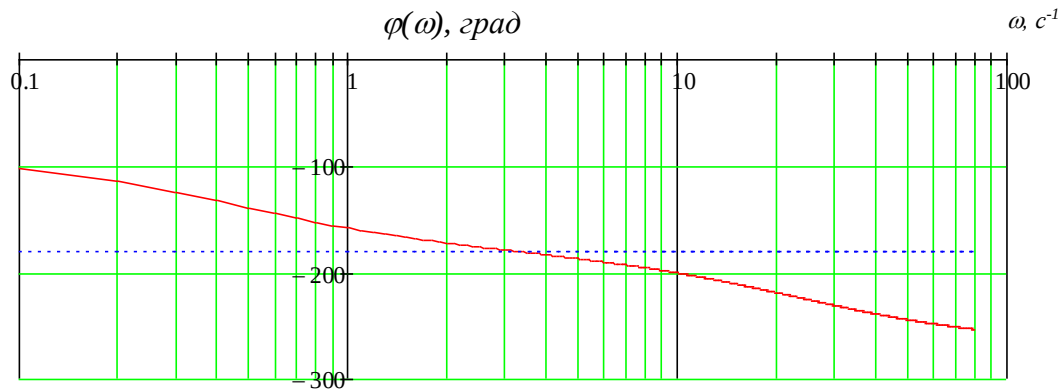


Рисунок 3.3 – ЛФЧХ розімкнутої системи $\phi(\omega)$

$$\phi(\omega) = \left(-\arctg(\omega T_0) - \left(\frac{\pi}{2} + \arctg(\omega T_1) \right) \right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (3.9)$$

3.3 Оцінка стійкості замкнутої системи та визначення її запасів стійкості. Побудова області стійкості

3.3.1 Аналіз стійкості системи за допомогою критерію Гурвіца. Критерій Гурвіца, який є алгебраїчним методом, дозволяє оцінити стійкість систем автоматичного регулювання високого порядку. Проте, застосовувати його зручніше для рівнянь не вище п'ятого порядку, оскільки при більш високих порядках складність обчислень значно зростає.

Відповідно до цього критерію умови стійкості формуються наступним чином.

Усі корені характеристичного рівняння $T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k = 0$ матимуть від'ємні дійсні частини, якщо всі коефіцієнти з додатними значеннями забезпечують позитивний головний

визначник Гурвіца $\Delta_2 > 0$ і всі його діагональні мінори є додатніми. Після підставлення значень коефіцієнтів та сталих часу, отримаємо:

$$0,21p^3 + 4,25p^2 + p + 7,128 = 0.$$

$$\Delta_2 := \begin{vmatrix} 4.25 & 7.128 \\ 0.21 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = 2.753$$

Оскільки головний визначник $\Delta_2 = 2,753 > 0$, обчислений за правилом визначників Гурвіца, а всі коефіцієнти мають додатні значення, можна зробити висновок, що система є стійкою за критерієм Гурвіца.

3.3.2 Аналіз стійкості системи та визначення області стійкості за допомогою методу D-розбиття в площині одного параметра.

Створимо область стійкості системи в площині параметра k_2 , оскільки його значення можна легко змінювати шляхом налаштування коефіцієнта підсилення підсилювача:

Характеристичне рівняння має наступну форму:

$$T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k_0 k_1 k_2 = 0$$

Запишемо характеристичне рівняння у залежності від параметра k_2 :

$$K(p) = - \frac{(T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p)}{k_0 k_1}$$

Підставивши значення $p = j\omega$ та виділивши дійсну і уявну частини цього виразу, ми отримаємо:

$$K(\omega) = - \frac{(-jT_1 T_0 \omega^3 - (T_1 + T_0) \omega^2 + j\omega)}{k_0 k_1} = \frac{(T_1 + T_0) \omega^2}{k_0 k_1} + j \frac{(T_1 T_0 \omega^3 - \omega)}{k_0 k_1}.$$

$$P(\omega) = \frac{(T_1 + T_0) \omega^2}{k_0 k_1}; \quad Q(\omega) = \frac{(T_1 T_0 \omega^3 - \omega)}{k_0 k_1}$$

Побудуємо криву D-розбиття в площині параметра k_2 , змінюючи частоту від $-\infty$ до $+\infty$ (рис. 3.6).

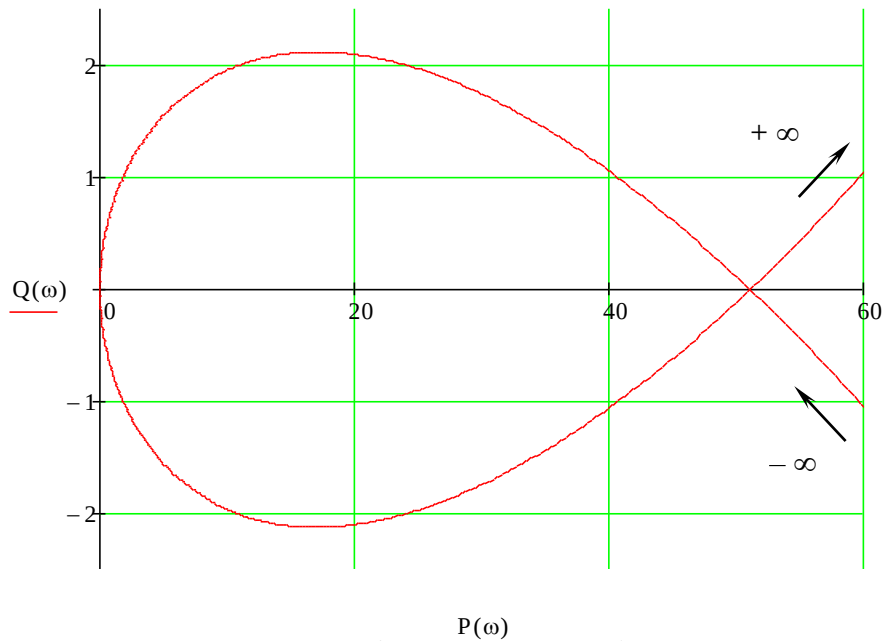


Рисунок 3.6 – D-розбиття у площині параметра k_2

У стійкій системі всі корені характеристичного рівняння розташовані ліворуч від уявної осі, і при переході від $-\infty$ до $+\infty$ ділянка стійкості буде знаходитися також ліворуч від отриманої кривої. Для зручності визначення цієї ділянки можна на кривій відзначити штриховку зліва при русі від $-\infty$ до $+\infty$. З побудованої області стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта k_2 , яке у цьому випадку становить $k_{2\text{кр}} = 51$. Як видно, задане значення коефіцієнта підсилення $k_2 = 18$ потрапляє в область стійкості, що дозволяє використовувати його для подальших розрахунків.

3.4 Оцінка ефективності регулювання замкнутої САР проводиться на основі ЛАЧХ розімкнутої системи

Оцінка якості регулювання замкнутої САР включає визначення запасу стійкості (за модулем і фазою) та частоти зрізу. Для цього необхідно побудувати ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкнутої системи та виконати їх взаємне порівняння.

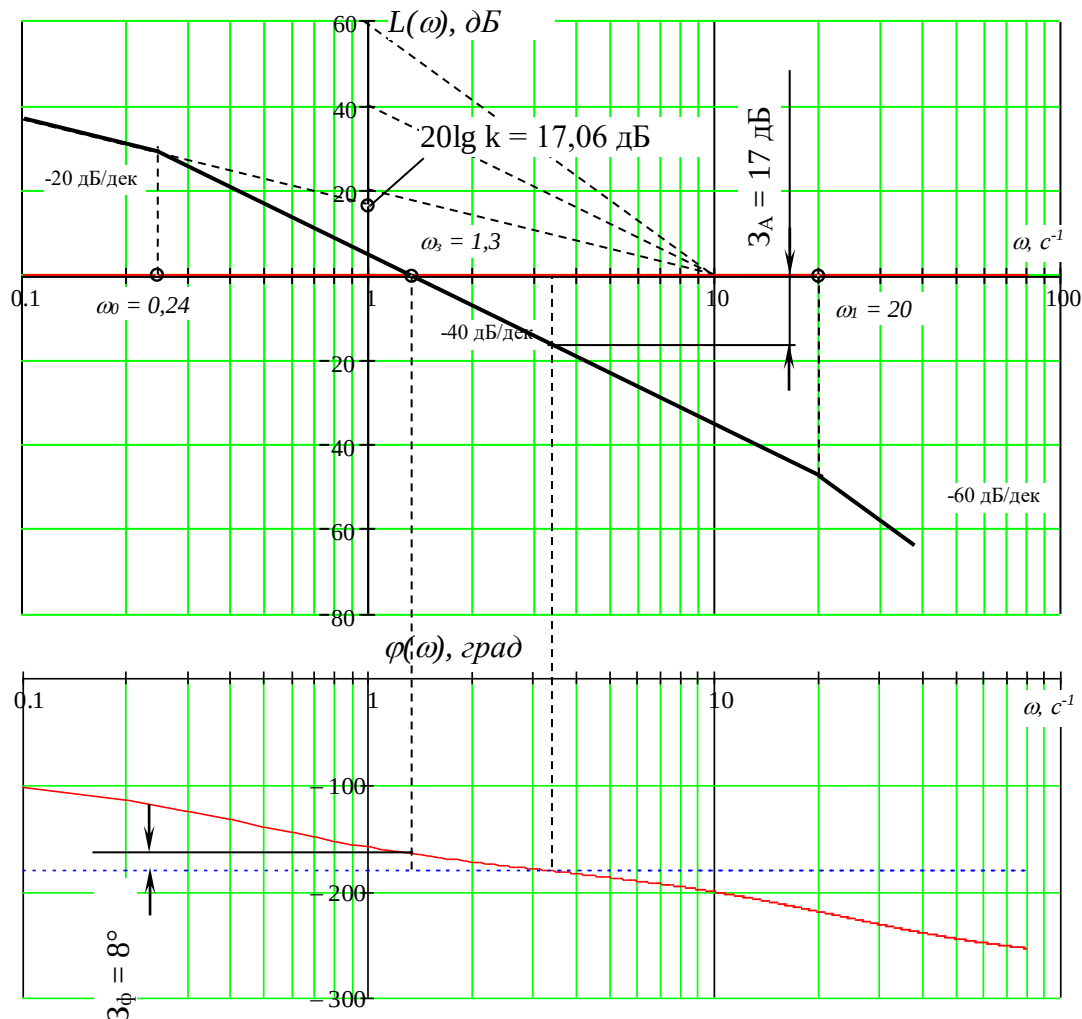


Рисунок 3.7 – Оцінка якості регулювання замкнутої САР за допомогою ЛАЧХ розімкнутої системи

З цієї побудови можна визначити наступні параметри: частота зрізу $\omega_z = 1,3 \text{ c}^{-1}$, що дозволяє обчислити час регулювання при жорстких умовах, $t_p = \frac{2\pi}{\omega_z} = 4,83$ який становить, відповідно, с; амплітудний запас стійкості $\gamma_A \approx 17$ дБ; фазовий запас стійкості $\gamma_\phi \approx 8^\circ$.

3.5 Моделювання перехідного процесу замкнутої системи

Залежність регульованої величини у часі при подачі одиничного ступінчастого впливу на вхід системи описується такою функцією

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega. \quad (3.13)$$

Підставивши необхідні значення, ми отримуємо наступний графік (рис. 3.8).

За графіком можна зробити висновок, що перехідний процес є коливальним і відбувається з постійним періодом коливань.

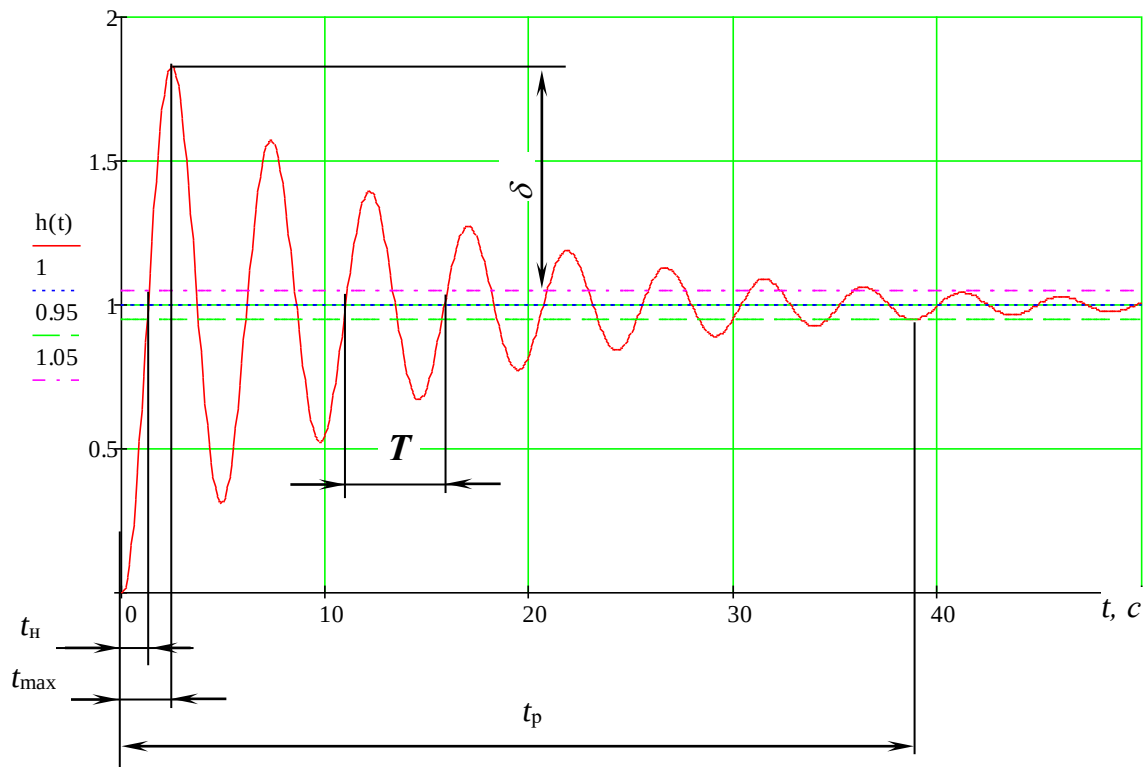


Рисунок 3.8 – Діаграма перехідного процесу вихідної системи

3.6 Оцінка основних показників якості САР за допомогою графіка перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як важливий критерій для аналізу та синтезу САР

З аналізу побудованого перехідного процесу можна визначити наступні основні показники якості САР:

- Час регулювання $t_p \approx 39$ с – це період від початку впливу на вхід до моменту, коли система входить у зону 2Δ . Цей параметр залежить від

швидкодії та кількості динамічних ланок у головному контурі. Оскільки до системи висуваються жорсткі вимоги, час регулювання, необхідний для аналізу та синтезу САР, встановлюється на рівні $t_p = 4,83$ с відповідно до ЛАЧХ розімкнутої системи, що створює ще суворіші умови.

- Перерегулювання $\delta = 82,9 \%$;
- Частота коливань $\omega = \frac{2\pi}{T} = 1,37$, де $T = 4,6$ с – період коливань;
- Кількість коливань $n = 7$;
- Час досягнення першого максимуму $t_{\max 1} = 2,5$ с;
- Час наростання перехідного процесу $t_n = 1,4$ с – це час, за який вихідна величина досягає сталого значення.
- Декремент затухання – показник затухання перехідного процесу, що дорівнює відношенню відхилень сусідніх коливань $d=1,45$.

Згідно з вимогами до системи, для її аналізу та синтезу час регулювання береться зменшеним на 30 % від отриманого значення, тобто $t_p = 3,38$ с.

3.7 Побудова оптимальної ЛАЧХ розімкнутої системи, яка відповідає вимогам щодо швидкодії, що до неї пред'являються

Вимоги до синтезованої САР включають: час регулювання $t_p = 3,38$ с; максимальне перерегулювання $\delta = 25\%$; запас стійкості за модулем не менше 15 дБ і за фазою не менше 30° . Для синтезу САР потрібно побудувати вихідну ЛАЧХ розімкнутої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коректуючого пристрою.

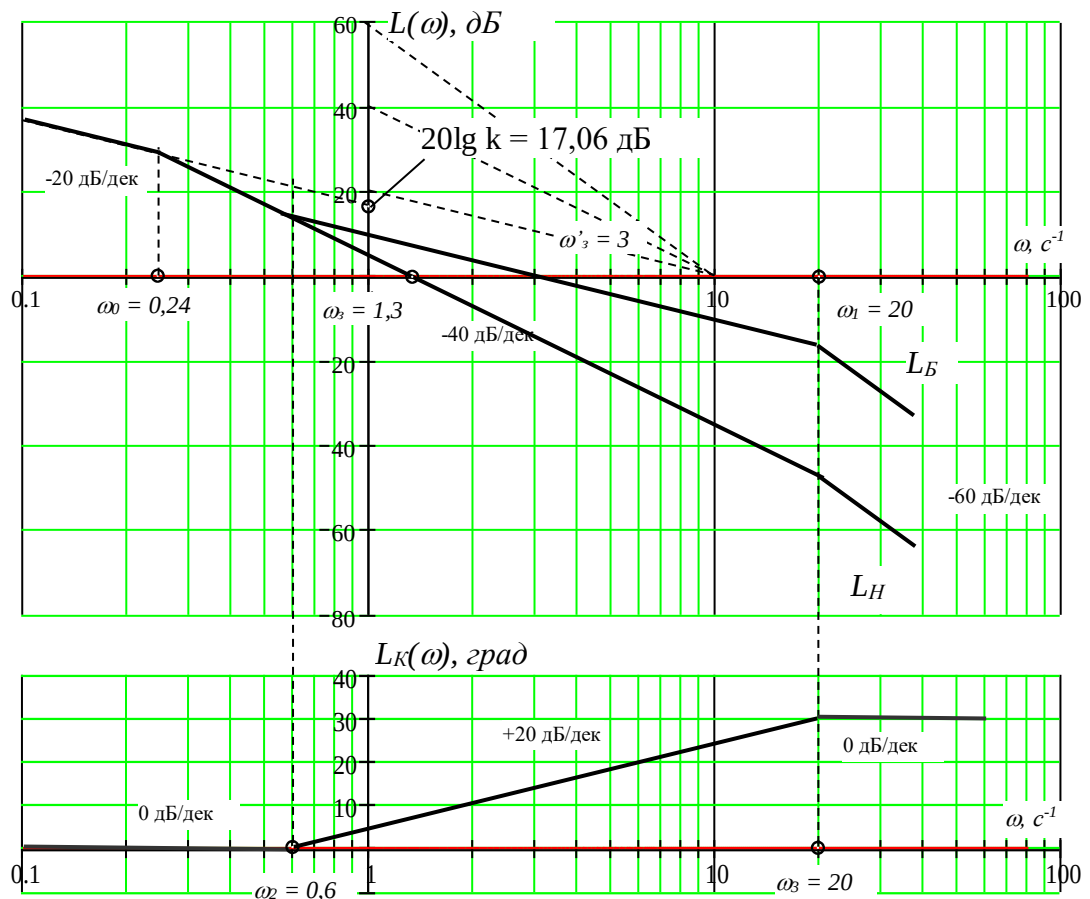


Рисунок 3.11 – Побудова бажаної ЛАЧХ і визначення ЛАЧХ корегуючого пристрою

ЛАЧХ коректуючого пристрою визначається як різниця між бажаною та незмінною ЛАЧХ: $L_K(\omega) = L_B(\omega) - L_H(\omega)$ (рис. 3.11).

Загальний вигляд передаточної функції коректуючого пристрою виглядає наступним чином:

$$W_{\text{кп}}(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{(T_3 p + 1)} \quad (3.15)$$

де $T_2 = 1/\omega_2 = 1/0,6 = 1,7$ с;

$T_3 = 1/\omega_3 = 1/20 = 0,05$ с

Після підставлення значень сталих часу у рівняння загального вигляду, отримуємо передаточну функцію коректуючого пристрою:

$$W_{\text{кп}}(p) = \frac{1 \cdot (1,7 p + 1)}{(0,05 p + 1)} \quad (3.16)$$

3.8 Складання графіка перехідного процесу для синтезованої САР

Сформулюємо передаточну функцію замкнутої системи з корекцією

$$W_{зк}(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) \cdot (T_3 p + 1) + k \cdot (T_2 p + 1)} \quad (3.17)$$

Здійснивши заміну $p = j\omega$, визначимо дійсну частину передаточної функції замкнутої системи для побудови її амплітудно-фазової характеристики.

$$P_3(\omega) = \frac{k \cdot T_2 \omega \left((1 + kT_2)\omega^5 - T_1(T_0 + T_1 + T_0 T_3)\omega^3 \right) + k(T_1 T_0 T_3 \omega^4 - (T_0 + T_1 + T)\omega^2 + k)}{\left(T_1 T_0 T_3 \omega^4 - (T_0 + T_1 + T)\omega^2 + k \right)^2 + \left((1 + kT_2)\omega^5 - T_1(T_0 + T_1 + T_0 T_3)\omega^3 \right)^2} \quad (3.18)$$

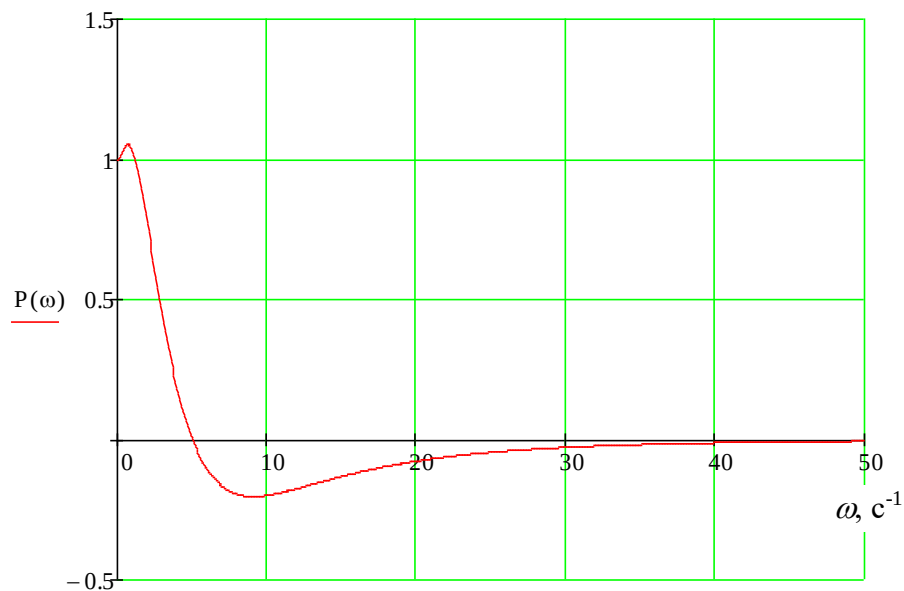


Рисунок 3.12 – Амплітудно-фазова характеристика замкнутої скорегованої системи

Створимо графік перехідного процесу для синтезованої системи автоматичного копіювання висоти стеблестою (рис. 3.13).

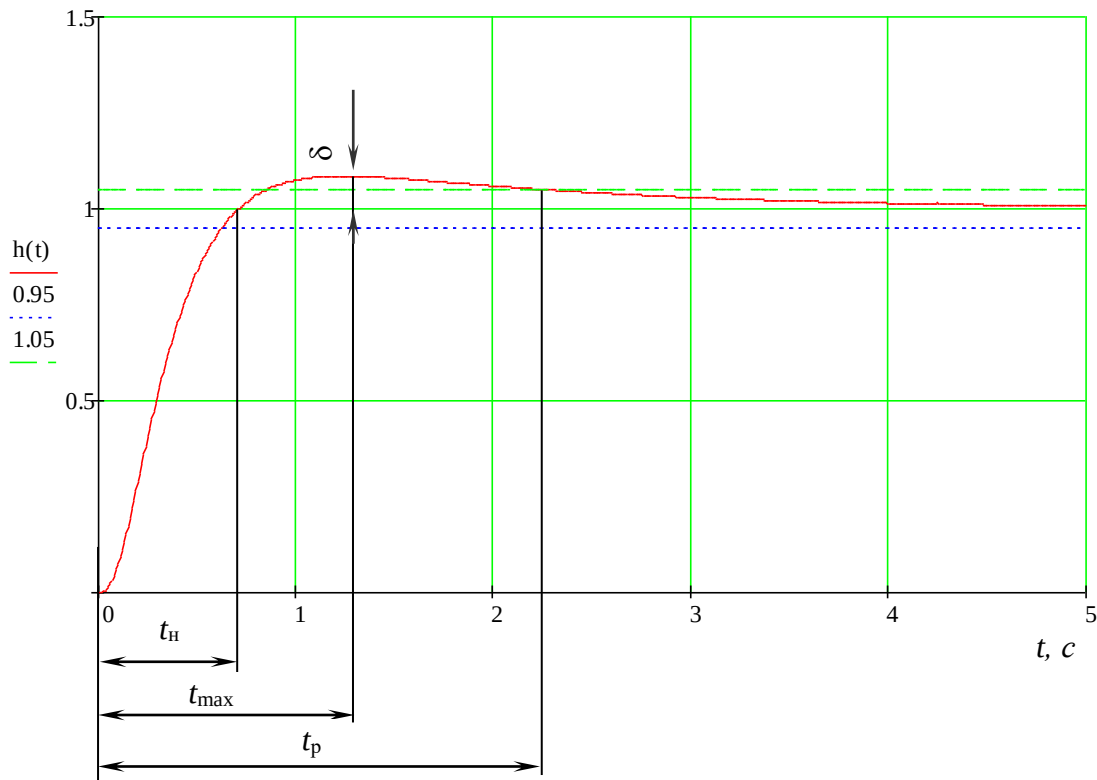


Рисунок 3.13 – Графік перехідного процесу системи, що була скорегована за допомогою синтезу

3.9 Оцінка прямих показників якості синтезованої системи автоматичного регулювання

За побудованим перехідним процесом можна визначити такі прямі показники якості системи автоматичного регулювання:

- час регулювання $t_p = 2,24$ с;
- перерегулювання $\delta = 8,5$ %;
- час досягнення першого максимуму $t_{\max} = 1,26$ с;
- час наростання перехідного процесу $t_n = 0,71$ с.

За формою кривої цей перехідний процес є аперіодичним з перерегулюванням, на відміну від перехідного процесу вихідної системи.

Отже, впровадження отриманої передаточної функції коректуючого пристрою відповідатиме встановленим вимогам до якості системи.

4 Впровадження системи автоматичного регулювання на практиці

4.1 Знаходження Z-перетворення передаточної функції регулятора

Для впровадження мікропроцесорної системи регулювання необхідно здійснити Z-перетворення передаточної функції регулятора, отриманої під час синтезу в розділі 3:

$$W_p(p) = \frac{(1,7p + 1)}{(0,05p + 1)} \quad (4.9)$$

Здійснимо розкладання передаточної функції регулятора на прості дроби:

$$W_p(p) = 34 - \frac{33}{(0,05p + 1)}. \quad (4.10)$$

Тепер проведемо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab, де час дискретизації становить $T_0 = 0,01$ с.

$$W_p(z) = 34 - \frac{11,37}{z - 0,574}. \quad (4.11)$$

$$W_p(z) = 34 - \frac{11,37 \cdot z^{-1}}{1 - 0,574 \cdot z^{-1}} \quad (4.12)$$

На основі отриманої дискретної передаточної функції регулятора формулюємо різницеві рівняння:

$$u[n] = u_1[n] + u_2[n];$$

$$u_1[n] = 34 x[n];$$

$$u_2[n] = -11,37 x[n-1] - 0,574 u_2[n-1];$$

Схему програмної реалізації показано на рисунку 4.1, де наведені значення коефіцієнтів:

$$a = 34; b_1 = -11,37; b_2 = -0,574;$$

На основі отриманої схеми програмної реалізації потрібно створити регулятор, використовуючи мікропроцесор.

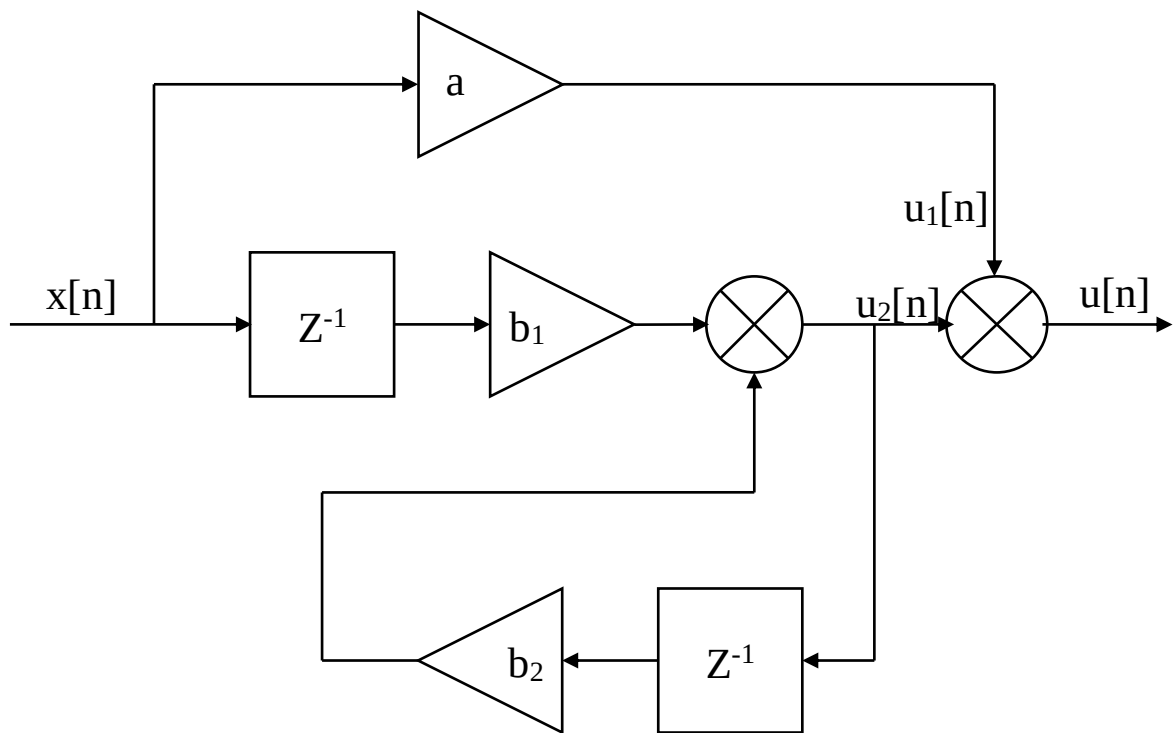


Рисунок 4.1 - Схема програмної реалізації регулятора

4.2 Опис принципової схеми регулятора

Цифровий регулятор системи автоматичного копіювання висоти стеблестою реалізовано на базі мікроконтролера PIC16F873, який відповідає за повний процес управління, створення інтерфейсу, аналого-цифрове перетворення та виконання математичних розрахунків. Мікроконтролер PIC16F873 входить до сімейства КМОП мікроконтролерів і характеризується наявністю вбудованої пам'яті EEPROM обсягом 1К x 14 біт для програм та 64 байт для збереження даних. Мікроконтролери цього сімейства відзначаються низькою вартістю та високою ефективністю роботи.

Мікроконтролери цього сімейства мають ефективну систему команд, що складається з 35 інструкцій. Усі команди мають розмір одного слова (14 біт) і виконуються за один цикл (400 нс при частоті 10 МГц), за винятком команд переходу, які потребують двох циклів (800 нс). PIC16F873 оснащений системою переривань, яка може бути активована чотирма джерелами, і має

восьмирівневий апаратний стек. Висока швидкість виконання команд досягається завдяки використанню двохшиної Гарвардської архітектури, на відміну від традиційної одношиної Фон-Неймановської архітектури. Гарвардська архітектура базується на окремих шинах і адресному просторі для команд і даних. Усі програмні об'єкти, такі як порти вводу/виводу, осередки пам'яті та таймери, реалізовані як фізичні апаратні регістри. Завдяки використанню Гарвардської архітектури досягається висока швидкість виконання бітових, байтових та регістрових операцій. Додатково, ця архітектура підтримує конвеєрне виконання інструкцій, що дозволяє одночасно виконувати поточну інструкцію та зчитувати наступну.

Периферійні пристрої включають восьмибітний таймер/лічильник з програмованим восьмибітним попереднім дільником (фактично, це шістнадцятибітний таймер) і тринадцять ліній для двонаправленого вводу/виводу.

У складі пристрою є датчик положення валу, встановлений на об'єкті управління, який перетворює положення у відповідну напругу; логічні, керуючі та сигнальні пристрої, блок індикації та клавіатура, а також джерела живлення.

Логічний пристрій перетворює напругу, що надходить від датчика положення, і за допомогою логічних операцій за спеціальним алгоритмом формує сигнали для керуючого та сигнального обладнання, а також для блоку індикації та клавіатури.

Мікроконтролер має таку структуру: пам'ять програм EEPROM, регістр команд, восьмирівневий стек, мультиплексор адреси, програмний лічильник, декодер команд, три модулі таймерів (TMR0, TMR1, TMR2), регістри спеціальних функцій (FSR, STATUS), модуль аналого-цифрового перетворювача, арифметико-логічний пристрій (АЛП), акумулятор (W), сторожовий таймер (WDT), таймер запуску генератора (PWRT), а також порти вводу/виводу (A, B, C) і мультиплексор.

Цей мікропроцесор має дві блоки пам'яті: пам'ять програм і пам'ять даних, кожна з яких має окремі шини, що дозволяє здійснювати послідовний доступ до обох типів пам'яті протягом одного машинного циклу. Програмний лічильник PIC16F873 є тринадцятибітовим і може адресувати пам'ять програм обсягом $8\text{K} \times 14$. Вектор скиду розташований за адресою 000H, а вектор переривань — за адресою 0004H. Пам'ять даних розділена на банки, що містять регістри загального призначення (GPR) і регістри спеціальних функцій (FSR). Біт RP1 (STATUS<6>) і біт RP0 використовуються для вибору банку. Кожен банк має розширення до 128 байтів. Регістри спеціальних функцій розташовані в нижній частині кожного банку, а над ними знаходяться регістри загального призначення, які виконані як статична ОЗУ. Усі банки містять регістри спеціальних функцій, при цьому деякі регістри спеціальних функцій одного банку можуть бути відображені в інших банках для полегшення програмування і забезпечення швидкого доступу.

Сторожовий таймер призначений для запобігання серйозних наслідків у разі випадкових збоїв програми. Його також можна використовувати в додатках, що потребують відліку часу. Принцип роботи сторожового таймера полягає в регулярному його скиданні за допомогою програми або зовнішнього сигналу до завершення часу витримки, щоб уникнути скиду процесора. Якщо програма функціонує нормально, команда скиду сторожового таймера повинна регулярно виконуватись, щоб не допустити скиду процесора.

Регістри спеціальних функцій використовуються центральним процесором та периферійними модулями для контролю виконання необхідних операцій і реалізовані як статична пам'ять. Ці регістри поділяються на дві категорії: ті, що належать безпосередньо центральному процесору, та периферійні. Регістр STATUS зберігає інформацію про стан арифметично-логічного пристрою, а також біти для вибору банку регістрів пам'яті даних. Регістр STATUS можна адресувати будь-якою командою, як і будь-який інший регістр.

Якщо регістр STATUS є об'єктом команди, що змінює біти z, dc, c, то запис у ці біти неможливий. Вони автоматично встановлюються відповідно до результатів виконаної операції. Крім того, результат операції з регістром STATUS може відрізнятися від початкового значення операнду.

Розглянемо принцип роботи регулятора. Перетворювач опору в напругу реалізований на мікросхемі LM324AN. Він включає генератор стабільного струму (ГСС), який базується на операційному підсилювачі DA1.1, компенсатор лінії зв'язку на операційному підсилювачі DA1.2, масштабний підсилювач сигналу (МПС) DA1.3 і формувач віртуальної землі (ФВЗ) DA1.4.

Генератор стабільного струму генерує вимірюваний струм, який проходить через датчик і викликає падіння напруги, пропорційне його опору. Вибір значення вимірюваного струму враховує кілька факторів. Оскільки перетворювач опору в напругу функціонує як підсилювач постійного струму (ППС), для зменшення впливу дрейфу напруги зміщення операційного підсилювача на результати вимірювання, струм слід вибирати якнайбільший. Однак цей струм обмежений характеристиками чутливого елемента та навантажувальною здатністю операційного підсилювача. Для генератора стабільного струму використано пристрій, який є підсилювачем постійного струму з додатнім і від'ємним зворотним зв'язком. Падіння напруги, створене струмом генератора, надходить на компенсатор лінії зв'язку, який є інвертуючим підсилювачем. Важливо, щоб проводи ліній зв'язку мали однаковий переріз і були виготовлені з однакового матеріалу. Також повинні використовуватися резистори з однаковим опором, наприклад, R9 або R13. Значення опору резистора визначається як половина опору R9 або R13.

Резистор R11 виконує функцію підтягування неінвертуючого входу DA1.2 до нуля у разі обриву лінії зв'язку. Його опір має бути у 1000 разів більший за опір датчика при максимальному положенні вала. Напруга з виходу компенсатора лінії зв'язку подається на масштабний підсилювач сигналів DA1.3. Цей підсилювач реалізований за класичною схемою неінвертуючого підсилювача і підвищує рівень сигналу до необхідного для

коректної роботи аналого-цифрового перетворювача, вбудованого в PIC-контролер. Резистор R21 використовується для запобігання перенавантаженню входу аналого-цифрового перетворювача у випадку, якщо операційний підсилювач переходить у режим насичення, при якому напруга на його виході

$$U_{KT3} = U_{жив} - 1,5V$$

- Апаратна частина та інтерфейс користувача включають шістнадцять кнопок: – „0 – 9, * ” – цифри для введення чисел;
- „Coef” – перехід у режим вводу коефіцієнтів різницевого рівняння;
- „Set” – перехід у режим зміни параметрів;
- „Options” – перехід у режим налаштування параметрів.

Для зменшення кількості ліній та спрощення конструкції використовується динамічна індикація. Регістр зсуву та дешифратор служать для реалізації цього процесу. Принцип динамічної індикації полягає в наступному: спочатку на вхід дешифратора подається код 1111, внаслідок чого на всіх його виходах встановлюється логічна одиниця, і жоден з розрядів індикатора не світиться.

Далі в регістр записується код потрібного символу, після чого на вхід дешифратора подається код, що відповідає обраному розряду індикатора.

Під час оновлення даних індикатора відбувається одночасне сканування клавіатури, яка складається з шістнадцяти кнопок, поділених на дві групи по вісім кнопок у кожній. Загальні виводи цих груп підключені до контактів RB6 та RB7 мікроконтролера. При натисканні будь-якої клавіші на один з входів подається сигнал логічного нуля з відповідного виходу дешифратора, що дозволяє визначити її код. Час оцінки стану кнопки не перевищує кілька мікросекунд.

Комутацію катодів індикаторів здійснюють транзистори VT1–VT4. Для сигналізації про вихід з ладу датчика температури використовується активний п'єзоелектричний випромінювач, який також включає підсилювач і генератор

сигналу з заданою частотою. Такий випромінювач не створює навантаження на порт мікроконтролера та забезпечує досить гучний звук.

Управління порошковою муфтою реалізується за допомогою модулятора ширини імпульсу, інтегрованого в мікроконтролер. Мікроконтролер PIC16F873 має два виходи для модулятора ширини імпульсу — RC1 і RC2. Цей модулятор генерує серію імпульсів з фіксованою частотою та періодом, змінюючи ширину імпульсів для формування необхідної форми сигналу. У цьому випадку широтно-імпульсна модуляція здійснюється шляхом генерування сигналу з програмованою частотою та заповненням.

Процедура програмування режиму широтно-імпульсного модулятора включає:

1. Встановлення періоду широтно-імпульсного модулятора.
2. Встановлення ширини імпульсу.
3. Налаштування контактів RC1 і RC2 як виходів.
4. Установлення коефіцієнта попереднього ділення.
5. Переведення модулятора CCP у режим широтно-імпульсної модуляції.

Для формування вихідної напруги, пропорційної середньому часу високого рівня, використовується фільтр низьких частот. Щоб підсилити цю напругу до рівня, необхідного для формування сигналу управління транзисторними частотними перетворювачами, застосовуються буферні підсилювачі DA9 і DA10.

Джерело живлення складається з трансформатора, випрямляючого моста, мікросхемних стабілізаторів та фільтруючих конденсаторів. Прецизійний термокомпенсований стабілізатор генерує зразкову напругу, яка подається на вивід мікроконтролера, генератор стабільного струму та формувач віртуальної землі.

Ініціалізація мікроконтролера відбувається при подачі живлення зовнішнім сигналом на вхід MCLR. Після запуску мікроконтролер виконує підпрограми для ініціалізації портів A, B і C. Зокрема, контакти порту A RA1 і

RA3 налаштовуються як входи, а контакти RA4 і RA5 – як виходи для забезпечення зв'язку мікроконтролера з персональним комп'ютером шляхом встановлення відповідних розрядів у регістрі TRISA. Контакти портів B і C налаштовуються як виходи шляхом занесення відповідних комбінацій до регістрів TRISB і TRISC відповідно.

Порт A є двонаправленим портом вводу/виводу з шириною шість бітів. При перевірці стану виводів порту відбувається зчитування їхнього стану, тоді як запис до порту викликає оновлення регістру-записувача. Вивід RA4 мультиплексований із виходом модуля таймера TMR0 (вивід RA4/TOCK1). Контакт RA4/TOCK оснащений тригером Шмідта на вході та відкритим колектором вихідного транзистора на виході. Інші виводи порту мають вхідні буфери TTL і повні вихідні драйвери КМОП. Після запису даних у регістр порту вводу/виводу ці дані автоматично відображаються на контактах I/O, звідки їх можна зчитувати. Всі операції запису реалізуються за принципом читання-модифікації-запису. Це означає, що під час запису дані спочатку зчитуються з контактів порту, змінюються, а потім записуються в регістр даних порту.

Порт B є восьмибітним двонаправленим портом вводу/виводу. Установлення бітів регістру TRISB в одиницю переводить виводи порту в режим високого імпедансу, а запис нуля активує вихідні драйвери на відповідних контактах. Кожен вивід порту B має внутрішнє слабе підтягування завдяки вбудованим резисторам. Для активації підтягування необхідно записати "0" в розряд RBPU (OPTION_REG <7>). Підтягування автоматично вимикається, коли контакт порту налаштовується як вихід.

Порт C є восьмирозрядним двонаправленим портом вводу/виводу, де кожен розряд можна конфігурувати як вхід або вихід за допомогою програмування регістра TRISC. Контакти порту C можуть використовуватись для підключення периферійних пристроїв. На входах порту C встановлені буфери з тригерами Шмідта.

З клавіатури до пам'яті мікроконтролера вводяться значення коефіцієнтів різницевого рівняння.

Процес регулювання температури починається після отримання сигналу від системи дозування про завершення завантаження шоколадної маси в темперуючий циліндр. При цьому на контакті RA4 порту A встановлюється логічна одиниця, а на контакті RA5 — логічний нуль. Одночасно змінюється стан контакту RB7: сигнал на контакті RB7 дорівнює “1”, якщо завантаження відбулося, і “0”, якщо процес ще не завершився. Програма постійно перевіряє стан контакту RB7. Коли на контакті RB7 з'являється сигнал логічної одиниці, запускається таймер Timer 0, який контролює час охолодження та нагрівання. Модуль таймера 0 є таймером/лічильником з наступними характеристиками: – восьмирозрядний таймер/лічильник; – можливість читання та запису лічильника; – восьмирозрядний програмований попередній лічильник; – вибір зовнішньої або внутрішньої синхронізації; – переривання при переповненні, перехід від FFH до 00H; – можливість вибору фронту при зовнішній синхронізації.

Час технологічного циклу контролюється за допомогою таймера Timer 1. Якщо на клавіатурі натиснута будь-яка клавіша, генерується сигнал переривання через зміну стану контактів порту B, і виконується відповідна підпрограма обробки натискання. Окрім цього переривання, мікроконтролер має 14 інших джерел переривань. Регістр контролю переривання (INTCON) містить біти для загального та локального переривання. Біт загального переривання GIE (INTCON<7>) дозволяє обробку всіх немаскованих переривань, якщо вони були попередньо увімкнені. Коли біт GIE встановлений, і ознака та маска переривання активні, переривання відбувається негайно. Локальні переривання можуть бути заборонені шляхом встановлення відповідних бітів у регістрах. Локальні переривання активуються за допомогою біта GIE, який очищується під час скиду. Повернення з переривання здійснюється за допомогою команди RETFIE.

Після виходу з підпрограми обробки переривання біт GIE відновлюється, що дозволяє обробляти нові переривання.

Регістр INTCON включає прапорці, які відповідають за переривання, що виникають при зміні стану входу RB0/INT порту В, а також по завершенню циклу роботи таймера TMR0.

Прапорці периферійних переривань розташовуються в регістрах спеціальних функцій PIR1 і PIR2. Біти для активації цих переривань зберігаються в регістрах PIE1 і PIE2. На початку обробки переривання біт GIE скидається, що блокує подальші переривання. Адреса повернення із переривання записується в стек, а програмний лічильник отримує значення 0004H. У підпрограмі обробки переривань визначається джерело переривання за допомогою перевірки прапорців бітів. Прапорець переривання необхідно скинути перед наступним перериванням.

При зовнішньому перериванні, наприклад, при спрацюванні виходу INT порту В, тривалість обробки переривання складає 3-4 машинних цикли.

Після цього формуються керуючі дії, і розпочинається опитування датчика. Сигнал з датчика, пройшовши через перетворювач опору в напругу, масштабний підсилювач і формувач віртуальної землі, надходить на вбудований в контролер аналого-цифровий перетворювач. Мікроконтролер оснащений восьмирозрядним модулем аналого-цифрового перетворювача.

Після виконання перетворення пристрій створює цифровий результат, який відповідає аналоговому рівню, використовуючи метод послідовної апроксимації. Цей результат представлений у вигляді десятибітної цифрової комбінації. Модуль аналого-цифрового перетворювача має еталонні напруги високого і низького рівня.

Модуль аналого-цифрового перетворювача може функціонувати навіть тоді, коли процесор знаходиться в режимі „SLEEP”. Для роботи в цьому режимі необхідно, щоб лічильник був налаштований за допомогою RC-генератора. З модулем аналого-цифрового перетворювача взаємодіють чотири регістри: –

реєстри результатів ADRESH і ADRESL; – реєстри управління ADCON1 і ADCON0.

Реєстри ADCON1 використовуються для налаштування конфігурації виводів порту. Виводи порту можуть бути сконфігуровані як аналогові входи.

Реєстри ADRESH і ADRESL зберігають десятибітовий результат аналого-цифрового перетворення. Після завершення перетворення результат записується в цю пару реєстрів. Біти GO/DONE реєстру ADCON0<2> скидаються, і встановлюється прапорець переривання по завершенню аналого-цифрового перетворення, біт ADIF. Перед початком перетворення необхідно вибрати канал, через який буде здійснюватись перетворення. Канали аналогових входів повинні бути відповідно налаштовані за допомогою реєстру TRISA. Ось порядок налаштування модуля:

1. Налаштувати аналогові входи та джерело (реєстр ADCON1).
 - Вибрати канал для аналого-цифрового перетворення (ADCON0).
 - Визначити джерело синхронізації (реєстр ADCON0).
 - Запустити модуль аналого-цифрового перетворення (ADCON0).
2. Налаштувати переривання від аналого-цифрового перетворювача, якщо потрібно:
 - Скинути біт ADIF.
 - Встановити біт ADIE.
 - Встановити біт GIE.
3. Затримати час, необхідний для вибірки/збереження.
4. Для запуску перетворення встановити біти GO/DONE реєстру ADCON0.
5. Після завершення часу перетворення скинути біт GO/DONE або дочекатися переривання від аналого-цифрового перетворювача.
6. Результат перетворення буде в реєстрах ADRESH і ADRESL; при необхідності скинути біт ADIF.

Скидання біту GO/DONE під час виконання перетворення призводить до переривання поточного процесу перетворення. У разі, якщо перетворення не завершено, вміст регістрів результату не оновлюється, і регістри ADRESH і ADRESL залишають значення останнього завершеного перетворення (або останнього записаного значення). Якщо у парі регістрів ADRESH і ADRESL ще не збережено результат аналого-цифрового перетворення, ці регістри можна використовувати як регістри загального призначення.

Час виконання перетворення для кожного біта визначається як T_{AD} . Для перетворення з десяти бітів необхідно щонайменше $12T_{AD}$. Для коректної роботи аналого-цифрового перетворення T_{AD} має дорівнювати $1.16\mu s$. Регістри ADCON1 і TRIS використовуються для налаштування виводів порту, що відповідають за аналого-цифрове перетворення. Виводи, які призначені для роботи в аналоговому режимі, повинні мати відповідні біти регістру TRIS, налаштовані на вхід. Скидання біту в регістрі TRIS змінює рівень на протилежний. Для забезпечення точності перетворення необхідно повністю зарядити конденсатор збереження C_{HOLD} напругою вхідного сигналу. Час виконання одного розряду аналого-цифрового перетворення становить T_{AD} , а повне восьмирозрядне перетворення виконується за $9,5 T_{AD}$.

Висновки

1. У процесі виконання кваліфікаційної роботи була досліджена технологія збирання зернових культур, зокрема рису, за допомогою методу очісування, а також розглянуті тенденції розвитку зернозбиральної техніки та систем автоматичного управління положенням очісуючого пристрою.

2. Розроблено структурну схему системи автоматичного копіювання висоти стеблестою та обрано її компоненти.

3. У роботі проведено аналіз системи автоматичного копіювання висоти стеблестою, визначено резерви стійкості, час регулювання та інші параметри системи без використання регулятора.

4. За допомогою методів аналізу та синтезу була визначена передаточна функція регулятора та оцінені показники якості роботи скоригованої системи: час регулювання $t_p = 2,24$ с; перерегулювання $\delta = 8,5$ %; час наростання перехідного процесу $t_n = 0,71$ с; час досягнення першого максимуму $t_{\max} = 1,26$ с; за характером кривої перехідний процес є аперіодичним з перерегулюванням; амплітудний запас стійкості Z_A становить не менше 15 дБ, а фазовий запас стійкості Z_ϕ – не менше 30° .

5. Створено принципову схему системи автоматичного копіювання висоти стеблестою для рисозбирального комбайну та розроблено алгоритм програмної реалізації.

Список літератури

1. Сисолін П.В., Мороз М.М. Експериментальні дослідження процесу обчісування зернових колосових культур обчісуючим пристроєм // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2000. – С. 256-261.
2. Кондратець В.О. Теорія і технічні засоби систем: Підручник. – К.: Вища шк., 1993. – 319 с.
3. Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.Г. Теорія технічних систем. -К.: Тернопіль, 1998.-310с.
4. Стеклов В.К. Проектування систем автоматичного керування. -К.:Вища школа,1995.-231 с.
5. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління: Підручник. – К.: НАУ, 2003. – 208 с.
6. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій.-К.:Вища школа,1995.-519 с.
7. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
8. Довідник по автоматизації с/г виробництва //За ред. І.І. Мартиненка.- К.:Урожай,1985.-212 с.
9. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
10. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П.,Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.
11. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
12. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.
13. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. Львів : Афіша, 2005.

350 с.

14. Гогіташвілі Г. Г., Лапін В. М. Основи охорони праці : навч. посіб. 3-є вид., стереотипн. Львів : «Новий Світ – 2000». 2006. 232 с.
15. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
16. Конституція України. Київ : Андронум, 2020. 60 с.
17. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 21.10.2024).
18. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення: 03.11.2024).
19. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення: 03.11.2024).
20. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 29.10.2024).
21. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення: 24.10.2024).
22. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 17.11.2024).
23. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 07.10.2024).
24. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

- 25.Вікіпедія. Вільна енциклопедія : веб-сайт. URL:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення: 31.09.2024).
- 26.Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І.
Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
- 27.Іванов В. Г., Дзюндзюк Б. В., Олександров Ю. М. Охорона праці в
електроустановках : навч. посіб. / за ред. В. Г. Іванова. Київ : Око, 1994.
226 с.

ДОДАТОК А

ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Законодавчі та нормативні акти України з питань охорони праці

Охорона праці (ОП) – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці [13, 14, 15].

Охорона життя та здоров'я громадян у процесі їх трудової діяльності, створення безпечних і нешкідливих умов праці є одним із найважливіших державних завдань.

Правовими актами, у яких закріплено основні положення вітчизняного законодавства про ОП, є загальні закони, а також спеціальні нормативні та підзаконні акти.

Серед загальних законів, які утворюють правову основу з питань ОП, перш за все, слід відзначити: Конституцію України; Закони України: «Про охорону праці», «Основи законодавства України про охорону здоров'я», «Про систему громадського здоров'я», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування»; Кодекс цивільного захисту України (КЦЗ); Кодекс законів про працю України (КЗпП) [13, 14, 15].

Спеціальними нормативними актами в галузі ОП є Нормативно-правові акти з ОП (НПАОП), Державні стандарти України (ДСТУ), Державні будівельні норми (ДБН), Санітарні норми, Правила пожежної безпеки, Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) та інші нормативні документи [13, 14, 15].

В Основному Законі – Конституції України [16] питанням ОП присвячені декілька статей.

В статті 43 Конституції України записано: «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної

законом».

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (стаття 45 Конституції України).

У тексті статті 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист.

Основоположним законодавчим документом у галузі охорони праці є Закон України «Про охорону праці» [17], дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації, незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють.

З прийняттям у 1992 р. Закону України «Про охорону праці» принципово змінилися взаємовідносини власника підприємства і робітника у вирішенні проблем ОП. Власник підприємства почав нести повну відповідальність за створення безпечних умов праці, а за державою закріпилася функція нагляду за охороною праці, чим раніше опікалися профспілки.

В цьому Законі були задекларовані основні принципи державної політики в галузі ОП [17]:

- пріоритет життя і здоров'я працівників по відношенню до результатів виробничої діяльності підприємства;
- повна відповідальність роботодавця за створення безпечних і нешкідливих умов праці;
- повне відшкодування шкоди особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань;
- здійснення навчання населення, професійної підготовки, підвищення кваліфікації працівників з охорони праці та ін.

Відповідно до статті 49 Закону України «Про охорону праці» [17], за порушення законодавчих та інших нормативних актів про ОП, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за ОП і представників професійних спілок винні притягаються до дисциплінарної, адміністративної, кримінальної відповідальності, згідно із законодавством.

Питання охорони здоров'я та гігієни праці регламентуються Законами

України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» [18] та «Про систему громадського здоров'я» [19]. Вони визначають правові, організаційні, економічні та соціальні засади охорони здоров'я в Україні; регулюють суспільні відносини у цій галузі; передбачають розробку й реалізацію адміністрацією підприємств санітарних та протиепідемічних заходів; здійснення, в необхідних випадках, лабораторного контролю за дотриманням вимог санітарних норм стосовно рівнів шкідливих факторів виробничого середовища; формування органів та установ державної санепідеміологічної служби при надзвичайній події чи ситуації, що становлять небезпеку для здоров'я населення; відшкодування, в установленому порядку, працівникам та іншим громадянам збитків, яких завдано їх здоров'ю в результаті порушення санітарного законодавства.

Основними принципами державної політики в сфері використання ядерної енергії та радіаційного захисту, відображені у Законі України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [20], є:

- пріоритет захисту людини та навколишнього середовища від впливу іонізуючого випромінювання;
- забезпечення безпеки під час використання ядерної енергії;
- відкритість і доступність інформації, пов'язаної з використанням ядерної енергії і т. ін.

Основними принципами соціального страхування від нещасного випадку Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» [21] проголошує:

- обов'язковий порядок страхування працівників, а також учнів та студентів навчальних закладів;
- сплату страхових внесків тільки роботодавцями;
- своєчасне та повне відшкодування шкоди потерпілим;
- надання державних гарантій застрахованим у реалізації їх прав та ін.

КЦЗ України [22] регулює відносини, пов'язані із захистом населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій, реагуванням на них, функціонуванням єдиної державної системи

цивільного захисту, та визначає повноваження органів державної влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, органів місцевого самоврядування, права та обов'язки громадян України, іноземців та осіб без громадянства, підприємств, установ та організацій незалежно від форми власності.

Одним із головних документів, який забезпечує чітке виконання службових обов'язків працівниками, є КЗпП України [23]. КЗпП трактує вимоги до трудової діяльності громадян в Україні і регулює трудові відносини всіх працівників, сприяючи зростанню продуктивності праці і поліпшенню її якості. Кодекс спрямований на охорону трудових прав працюючих.

В КЗпП України зазначені наступні положення [23]: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років (стаття 176), а також осіб молодших 18 років (стаття 192); забороняється застосування праці жінок на важких роботах і роботах із шкідливими або небезпечними умовами праці (стаття 174).

НПАОП, які до початку 2003 р. носили назву Державні нормативні акти про ОП (ДНАОП), – це правила, норми, положення, стандарти, інструкції та інші документи, обов'язкові до виконання [13, 14, 15]. Законодавством передбачено, що залежно від сфери дії НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими. Реєстр ДНАОП, що діють на території України, виданий Держнаглядом праці в 1997 р. З 2003 р. ведеться реєстр НПАОП, який постійно поповнюється [15].

Серед НПАОП досить важливе місце посідають Державні стандарти України (ДСТУ) та Державні будівельні норми (ДБН) [13, 14]. ДСТУ почали розроблятися з 1992 р. і поступово вводилися в якості Національних стандартів у всіх сферах економіки, на заміну стандартам колишнього СРСР (Міждержавних стандартів ГОСТ). ДБН – нормативний акт технічного характеру, що встановлює обов'язкові вимоги до об'єкта нормування у будівництві. Об'єктами нормування у будівництві є: планування та забудова території, об'єкт будівництва, містобудування та архітектури і його складові частини, склад і зміст документації об'єктів будівництва, містобудування та архітектури тощо [13, 15].

Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми) затверджені Міністерством охорони здоров'я України (наприклад, «Положення про медичний огляд працівників певних категорій», «Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх»), Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН) стосовно окремих факторів виробничого середовища, певних технологічних процесів і конкретних виробництв, Державні санітарні норми та правила (ДСНП), Державні санітарні норми (ДСН), Державні санітарні правила (ДСП) [13, 15].

Доповнюють право у в галузі пожежної безпеки Правила пожежної безпеки України, постанови Верховної Ради України, укази і розпорядження Президента України, декрети, постанови та розпорядження Кабінету Міністрів України, рішення органів державної виконавчої влади, місцевого та регіонального самоврядування, прийняті в межах їх компетенції [13, 15].

ПУЕ визначають будову, принципи улаштування, особливі вимоги до окремих систем, їх елементів, вузлів і комунікацій електроустановок. ПУЕ встановлюють вимоги до електроустановок загального призначення змінного струму напругою до 750 кВ та постійного струму напругою до 1,5 кВ [24].

Власники підприємств, установ, організацій, або уповноважені ними органи, розробляють, на основі НПАОП, і затверджують власні положення, інструкції та інші нормативні акти з ОП, що діють у межах підприємства, установи, організації [13, 14, 15].

До основних нормативних актів підприємства належать:

- Положення про систему управління ОП на підприємстві;
- Положення про службу ОП підприємства;
- Положення про комісію з питань ОП підприємства;
- Положення про роботу уповноважених трудового колективу з питань ОП;
- Положення про навчання, інструктаж і перевірку знань працівників з питань ОП;

- Положення про організацію і проведення первинного та повторного інструктажів, а також пожежно-технічного мінімуму;
- Наказ про порядок атестації робочих місць щодо їх відповідності нормативним актам про ОП;
- Положення про організацію попереднього і періодичного медичних оглядів працівників;
- Положення про санітарну лабораторію підприємства;
- Інструкції з ОП для працюючих за професіями і видами робіт;
- Загальнооб'єктові та цехові інструкції про заходи пожежної безпеки;
- Перелік робіт з підвищеною небезпекою;
- Перелік посад посадових осіб підприємства, які зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань ОП;
- Наказ про організацію безкоштовної видачі працівникам певних категорій лікувально-профілактичного харчування;
- Наказ про організацію безкоштовної видачі молока або інших рівноцінних харчових продуктів працівникам підприємства, що працюють у шкідливих умовах;
- Наказ про порядок забезпечення працівників підприємства спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

Цей перелік може змінюватись і доповнюватись, залежно від специфіки кожного конкретного підприємства [14, 15].

Держава виступає гарантом створення безпечних і нешкідливих умов роботи для працівників підприємств, установ і організацій всіх форм власності.

A.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва при експлуатації системи оцінювання маси автомобіля при динамічному поосному зважуванні

Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого на

працівника за певних умов призводить до захворювання або зниження працездатності [13].

Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, дія якого на працівника, при певних умовах, призводить до травм або раптового різкого погіршення здоров'я [13].

Усі шкідливі та небезпечні фактори, що виникають у виробничих умовах, поділяються за природою дії на: фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні [13, 14, 15].

До фізичних шкідливих та небезпечних виробничих факторів належать: рухомі машини та механізми; пересувні частини виробничого устаткування; підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура поверхонь устаткування; підвищений рівень шумів та вібрацій на робочому місці, підвищений або понижений барометричний тиск в робочій зоні та його різка зміна; підвищена або понижена: вологість повітря, іонізація повітря; небезпечне значення напруги в електричному колі; підвищена напруженість електричного чи магнітного полів; відсутність чи нестача природного світла; недостатня освітленість робочої зони та ін.

При недостатній увазі до особливостей виробничого обладнання та технологічного процесу, а також неправильному зберіганні горючих, паливо-мастильних та вибухонебезпечних речовин вони можуть стати джерелом вибуху або пожежі.

Вибух – швидкоплинний фізичний або фізико-хімічний процес, що відбувається в обмеженому об'ємі за короткий проміжок часу [25].

Пожежа – це неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, що розповсюджується в часі і просторі та створює загрозу життю і здоров'ю людей, навколишньому середовищу, призводить до матеріальних збитків [13, 15, 25]. В умовах пожежі підвищення температури середовища до 60°C вже є життєво-небезпечним для людини. Вдихання робітниками розігрітого повітря, разом із продуктами згорання, може призвести до ураження органів дихання та смерті. Крім того, коли людина перебуває в зоні впливу пожежі, то вона може потрапити

під дію наступних небезпечних та шкідливих факторів: токсичні продукти згорання; вогонь; підвищена температура середовища; дим; недостатність кисню; руйнування будівельних конструкцій; вибухи, витікання небезпечних речовин, що відбуваються внаслідок пожежі; паніка.

Ще одним суттєво небезпечним фактором є можливість враження персоналу підприємства природною електрикою (блискавкою) під час грози. Особливо небезпечним цей чинник є для підприємств, на території яких є висотні споруди (будинки, водонапірні башти, антени зв'язку, димові труби та інші будівельні конструкції), а також географічно і кліматично розташованих у місцевостях, з підвищеною грозовою активністю. Причому, блискавка здатна як завдавати людям враження високою напругою і, як наслідок, електротравм, так і стати причиною пожеж та вибухів.

Хімічний шкідливий та небезпечний виробничий фактор – це наявність на робочому місці хімічних речовини, які за характером дії на організм людини поділяються на: загальнотоксичні, дратівні, канцерогенні, мутагенні та такі, що впливають на репродуктивну функцію.

До біологічних шкідливих та небезпечних факторів виробництва відносять об'єкти, дія яких на робітників викликає травми або захворювання: патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, грибки, спори і пилок рослин та ін.), макроорганізми (рослини, комахи, тварини) і продукти життєдіяльності мікро- та макроорганізмів.

Психофізіологічні небезпеки та шкідливості – це нервово-психічні та емоційні перевантаження; фізичні перевантаження (статичні й динамічні); монотонність праці; розумове перенапруження; перенапруження аналізаторів, зокрема, стомлення зору працюючого.

За характером дії на організм людини шкідливі та небезпечні виробничі чинники поділяються на 4 класи [14]:

- 1-й – надзвичайно небезпечні;
- 2-й – високонебезпечні;
- 3-й – помірно небезпечні;

4-й – малонебезпечні.

Один і той же небезпечний та шкідливий виробничий фактор за природою своєї дії може належати одночасно до кількох різних груп [13, 14, 15].

Конкретні умови діяльності істотно впливають на психічні та життєво важливі функції людини. Якщо вплив факторів (з врахуванням їх взаємодії) в конкретних умовах діяльності такий, при якому забезпечується нормальне здійснення психічних та життєво важливих функцій організму, не виникає високого напруження компенсаторних систем організму і вдало виконується задана трудова діяльність, то такі умови можуть бути визначені як сприятливі, або комфортні, а в найкращих умовах – як оптимальні. Коли, в силу дії факторів, виникає високе напруження компенсаторних систем організму, то такі умови визначаються як несприятливі, або дискомфортні, а при вираженому несприятливому ефекті – як екстремальні.

А.3 Заходи з усунення або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів виробництва при експлуатації системи оцінювання маси автомобіля при динамічному поосному зважуванні

Безпечність виробничого устаткування – це властивість виробничого устаткування відповідати вимогам безпеки праці під час монтажу (демонтажу) і експлуатації в умовах, установлених нормативною документацією.

Для усунення або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів на автопідприємстві, де здійснюється динамічне зважування транспортних засобів, слід дотримуватись основних правил техніки безпеки та виробничої санітарії [13, 14]:

- територія підприємства має бути огорожена і доступ до неї стороннім особам заборонений;
- у місцях проведення вантажно-розвантажувальних робіт територія

повинна бути спланована і мати тверде покриття. Нахил площ повинен бути не більше 3° ;

- на транспортних шляхах (залізничного, автомобільного та трубопровідного транспорту) мають бути встановлені попереджувальні знаки, вивішені плакати, які забороняють переходити шляхи у невстановленому місці;

- під час роботи всі працівники мають дотримуватись засобів колективної та особистої гігієни і виробничої санітарії.

Безпечність будь-якого виробничого устаткування забезпечується правильним вибором принципів дії, конструктивних схем, елементів конструкції; використанням засобів механізації, автоматизації та дистанційного керування; застосуванням у конструкції засобів захисту; дотриманням ергономічних вимог; включенням вимог безпеки в технічну документацію з монтажу, експлуатації, ремонту; транспортування та зберігання устаткування; використанням у конструкції устаткування безпечних та нешкідливих матеріалів.

Для того, щоб запобігти виникненню небезпеки при раптовому вимкненні джерел енергії всі робочі органи, а також пристрої, які використовуються для захоплення, затискування та підймання заготовок, деталей виробів, тощо, повинні оснащуватись спеціальними захисними пристосуваннями. Причому необхідно унеможливити самовільне вмикання робочих органів при відновленні подачі енергії.

Конструкції устаткування повинні забезпечувати захист людини від ураження електричним струмом, запобігати накопиченню статичної електрики в небезпечних кількостях. Устаткування має бути оснащене засобами сигналізації про порушення нормального режиму роботи, а в необхідних випадках (аваріях, небезпечних пошкодженнях, режимах близьких до небезпечних) – засобами автоматичної зупинки, гальмуванні та від'єднання від джерела енергії.

Для забезпечення пожежо- та вибухобезпеки на підприємстві передбачено наступні засоби пожежогасіння:

- внутрішній пожежний кран;

- вогнегасник хімічний;
- вогнегасна речовина – ящик з піском;
- вуглекислотний вогнегасник;
- пожежний щит: азбестове полотно, відра, лопати, сокира, багор.

Пожежна профілактика передбачає заходи з попередження та ліквідації пожеж, включаючи обмеження сфери розповсюдження вогню та забезпечення успішної евакуації людей та майна із приміщень, які горять.

Розміщення та улаштування складів для зберігання горючих та вибухонебезпечних речовин. на території підприємства виконуються із врахуванням протипожежних вимог (ДСТУ 2272-93).

При проектуванні устаткування необхідно враховувати умови його експлуатації з тим, щоб, при дії на нього різноманітних природних чинників: вологи, сонячної радіації, високих та низьких тисків і температур, а також механічних коливань, агресивних речовин тощо, устаткування не ставало небезпечним.

Для захисту будівлі підприємства, де розміщується персонал з обслуговування та налагодження системи оцінювання маси автомобіля при динамічному поосному зважуванні, від ураження природною електрикою (блискавкою) необхідно передбачити систему блискавкозахисту.

А.4 Розрахунок захисного заземлення в ремонтній майстерні, де відбуваються поточні та капітальні ремонти і обслуговування ризобирального комбайну

Захисним заземленням називається навмисне електричне з'єднання з землею металевих неструмопровідних частин, що можуть виявитися під напругою [14, 16, 27].

Головне призначення захисного заземлення – знизити потенціал на корпусі електроустаткування до безпечної величини.

Корпуси електричних машин, трансформаторів, світильників, апаратів і інші металеві неструмопровідні частини можуть виявитися під напругою при замиканні їхніх струмопровідних частин на корпус. Якщо корпус при цьому не має контакту з землею, дотик до нього так само небезпечний, як і дотик до фази.

Сфери застосування захисного заземлення [14, 15, 27]:

- мережі до 1000 В змінного струму – трифазні трипроводні з ізолюваною нейтраллю;
- однофазні двопроводні, ізольовані від землі, а також постійного струму двопроводні з ізолюваною середньою точкою обмоток джерела струму;
- мережі понад 1000 В змінного і постійного струму, з будь-яким режимом нейтральної або середньої точки обмоток джерел струму.

Захисному заземленню підлягає наступне устаткування [14, 15, 27]:

- у приміщеннях з підвищеною небезпекою й особливо небезпечних, а також у зовнішніх установках заземлення є обов'язковим при номінальній напрузі електроустановки вище 42 В змінного струму і 110 В постійного струму;
- у приміщеннях без підвищеної небезпеки заземлення є обов'язковим при напрузі 380 В і вище змінного струму і 440 В і вище постійного струму;
- у вибухонебезпечних приміщеннях заземлення виконується незалежно від значення напруги.

Розрахуємо захисне заземлення електрообладнання в ремонтній майстерні, де відбуваються поточні та капітальні ремонти і обслуговування рисозбирального комбайну та іншого зернопереробного обладнання, із електричною мережею $U = \sim 220 / 380$ В.

Кліматична зона – 3.

Склад ґрунту – однорідний.

Тип заземлюючого пристрою – сталеві вертикальні труби.

Довжина вертикальних заземлювачів $L = 2,5$ м.

Відстань між електродами $a = 5$ м; $H_0 = 0,7$ м.

Розміри з'єднувальної стрічки $B_c = 20 \times 4$ мм.

Допустимий опір розтікання струму в заземлювачі $R_\partial = 2$ Ом.

Розрахунок проведемо за методикою, викладеною у [14, 15].

1. Визначаємо розрахунковий питомий опір.

З табл. 7.2 [15], знаходимо питомий табличний опір $\rho_{таб}$, враховуючи початкові умови.

В нашому випадку $\rho_{таб} = 40$.

З табл. 7.4 [15] знаходимо коефіцієнт сезонності κ_c , враховуючи початкові умови.

$\kappa_c = 1,3$.

Розрахунковий питомий опір обчислюємо за співвідношенням:

$$\rho_{роз} = \rho_{таб} \cdot \kappa_c . \quad (A.1)$$

$$\rho_{роз} = 40 \cdot 1,3 = 52 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

2. Визначаємо відстань від поверхні землі до середини вертикального стержня:

$$H = H_0 + \frac{l}{2} . \quad (A.2)$$

$$H = 0,7 + \frac{2,5}{2} = 1,95 \text{ м}.$$

3. Визначимо опір розтікання в одному вертикальному заземлювачі:

$$R_{\epsilon} = 0,366 \cdot \frac{\rho}{l} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot H + l}{4 \cdot h - l} \right) . \quad (A.3)$$

$$R_{\epsilon} = 0,366 \cdot 20,8 \cdot (\lg(111) + 0,5 \cdot \lg(1,943)) = 7,61 \cdot (2,045 + 0,0144) = 16,66 \text{ Ом}.$$

4. Визначаємо приблизну кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_{\epsilon}}{R_0} . \quad (A.4)$$

$$n = \frac{16,66}{2} = 8,3 .$$

5. Із табл. 7.5 [15], визначаємо коефіцієнт використання $\eta_{\epsilon\epsilon} = 0,74$.

6. Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів:

$$n_{\epsilon} = \frac{R_{\epsilon}}{R_0 \cdot \eta_{\epsilon}}. \quad (\text{A.5})$$

$$n_{\epsilon} = \frac{16,66}{2 \cdot 0,74} \approx 11.$$

Розміщуємо їх у ряд.

7. Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму в вертикальному заземлювачі, без врахування з'єднувальної стрічки:

$$R_{\text{роз.в}} = \frac{R_{\epsilon}}{n \cdot \eta_{\epsilon}}. \quad (\text{A.6})$$

$$R_{\text{роз.в}} = \frac{16,66}{11 \cdot 0,74} = 2,05 \text{ Ом.}$$

8. Визначаємо довжину з'єднувальної стрічки:

$$L_c = 1,05 \cdot a \cdot (n - 1). \quad (\text{A.7})$$

$$L_c = 1,05 \cdot 5 \cdot (11 - 1) = 1,05 \cdot 5 \cdot 10 = 1,05 \cdot 50 = 52,5 \text{ м.}$$

9. Визначаємо опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі:

$$R_{\epsilon} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \cdot \ln \frac{2L^2}{H_0 \cdot B_c}. \quad (\text{A.8})$$

$$R_{\epsilon} = \frac{52}{2 \cdot 3,14 \cdot 52,5} \cdot \ln \frac{5512,5}{0,7 \cdot 0,02} = \frac{52}{329,7} \cdot \ln \frac{5512,5}{0,014} = 0,157 \cdot 12,88 = 2,03 \text{ Ом.}$$

10. Визначаємо коефіцієнт використання горизонтального заземлювача, з табл. 7.6 [15], $\eta_{\epsilon} = 0,75$.

11. Визначаємо опір горизонтального заземлювача, із врахуванням коефіцієнта використання:

$$R_{\text{роз.г}} = \frac{R_{\epsilon}}{\eta_{\epsilon}}. \quad (\text{A.9})$$

$$R_{\text{роз.г}} = \frac{16,66}{11 \cdot 0,74} = \frac{2,03}{0,75} = 2,7 \text{ Ом.}$$

12. Визначаємо опір розтікання струму в вертикальному та горизонтальному заземлювачах, враховуючи, що вони з'єднані між собою паралельно:

$$R_{розр} = \frac{R_{розв} \cdot R_{розг}}{R_{розв} + R_{розг}}. \quad (A.10)$$

$$R_{розр} = \frac{2,05 \cdot 2,7}{2,05 + 2,07} = 1,16 \text{ Ом.}$$

Це менше між допустиме значення $R_0 = 2 \text{ Ом}$, тому спроектоване захисне заземлення є дієвим.

Схема захисного заземлення електрообладнання в ремонтній майстерні, де відбуваються поточні та капітальні ремонти і обслуговування рисозбирального комбайну та іншого зернопереробного обладнання, наведена на *рис. А.1*.

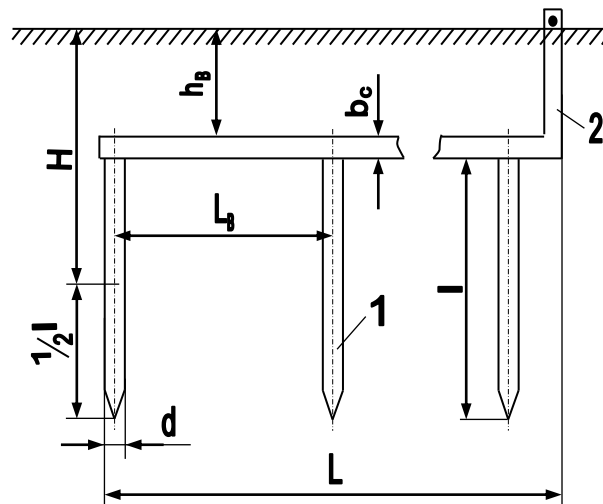


Рисунок А.1 – Схема захисного заземлення електрообладнання в ремонтній майстерні, де відбуваються поточні та капітальні ремонти і обслуговування рисозбирального комбайну та іншого зернопереробного обладнання:

1 – вертикальний заземлювач; 2 – горизонтальний заземлювач

Таким чином, використовуючи лише штучне заземлення, ми використали 11 заземлювачів у вигляді сталевих вертикальних труб. Цього виявилось достатньо для забезпечення поставленої умови безпеки.