

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою АВП

к.т.н., доцент

_____ О.К. Дідик

“ ____ ” _____ 2025 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:
«Модернізація системи стабілізації швидкості руху
зернозбирального комбайна»
«Modernisation of the system for stabilising the speed of
a combine harvester»

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи АК-21

спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

_____ Трипольський М.О.

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи

доц, канд.техн.наук

_____ Березюк І.А.

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Призначення, та область застосування системи автоматичного керування швидкістю руху комбайна в умовах зміни завантаження	7
1.1 Опис комбайна.....	7
1.2 Обґрунтування вибору теми.....	9
2 Існуючі рішення і обґрунтування принципів створення системи управління рухом комбайна при зміні навантаження	11
2.1 Автомати завантаження зернозбиральних комбайнів.....	11
2.2 Пристрій контролю завантаження молотарки регулюванням крутного моменту на валу молотильного барабану.....	13
2.3 Перспективи подальших робіт по автоматизації завантаження комбайнів.....	15
3 Опис системи автоматичного керування швидкістю руху комбайна	18
3.1 Розробка функціональної схеми системи автоматичного керування швидкістю руху комбайна.....	18
3.2 Обґрунтування вибору вузлів системи автоматичного керування швидкістю руху комбайна	25
3.3 Обґрунтування вибору вторинного перетворювача.....	30
3.3.1 Потенціометричний датчик.....	30
3.3.2 Сельсини.....	31
3.3.3 Обертові трансформатори.....	32
3.3.4 Прецизійні обертові трансформатори.....	32
3.3.5 Перетворювачі кут-код.....	33
3.3.6 Розробка конструкції перетворювача.....	34
3.4 Обґрунтування вибору виконавчого механізму.....	34
3.5 Обґрунтування виробу та опис конструкції САК швидкістю руху комбайна	39
4 Розрахунки, що підтверджують працездатність виробу.....	41

4.1	Визначення передаточної функції системи.....	41
4.2	Робота системи на першій і на другій іншій передачі.....	48
5	Роботи, пов'язані із застосуванням САК рухом комбайна в умовах зміни завантаження хлібною масою.....	55
	Висновки.....	57
	Список літератури.....	58

ВСТУП

Україна вирощує широкий спектр зернових культур, зокрема озиму та яру пшеницю, жито, ячмінь, овес, просо, гречку та інші. Це робить її однією з небагатьох країн у світі, здатних забезпечити таке розмаїття аграрної продукції. Щороку українське сільське господарство виробляє велику кількість зерна, яке використовується як для задоволення внутрішніх потреб, так і для експорту. Це, у свою чергу, відіграє важливу роль у наповненні державного бюджету.

Технологія збирання врожаю передбачає виконання низки операцій, серед яких — зрізання стебел, обмолот, відокремлення зерна від інших частин рослини, видалення незернових компонентів і транспортування зерна до місця його подальшої обробки.

Основним механізмом для збирання зернових культур є комбайн. Однією з найпоширеніших моделей в Україні є СК-5 "НИВА". Проте в країні спостерігається дефіцит збиральної техніки. Аналіз статистичних даних, починаючи з 2011 року, свідчить про стійку тенденцію до скорочення її кількості. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває необхідність удосконалення вже наявних машин задля продовження їх експлуатаційного ресурсу.

Техніка, яка експлуатується протягом тривалого часу, потребує модернізації та покращення характеристик окремих вузлів, що зазнають значних навантажень. Особливо це стосується систем автоматичного завантаження хлібної маси, які працюють в умовах нестабільної врожайності. Істотна нерівномірність урожаю вздовж гону спричиняє коливання навантаження та підвищену динамічність роботи окремих компонентів, що часто мають обмежений запас міцності або майже не мають його взагалі, що негативно позначається на їх надійності.

Режим роботи зернозбирального комбайна залежить від цілого ряду факторів, зокрема швидкості його руху по полю, частоти обертання робочих

валів і двигуна, об'єму подачі хлібної маси, а також крутних моментів, що діють на основні робочі вузли.

Для забезпечення ефективної та стабільної роботи зернозбирального комбайна надзвичайно важливо підтримувати основні технологічні параметри в межах заданих значень. До таких параметрів належать швидкість руху комбайна по полю, частота обертання робочих механізмів, оберти вала двигуна, обсяг подачі хлібної маси та крутні моменти на основних валах. Початкове налаштування машини передбачає встановлення оптимального співвідношення між цими параметрами відповідно до очікуваних умов роботи.

Однак у практиці збирання врожаю часто спостерігаються коливання врожайності по полю, а також зміни фізико-механічних властивостей хлібної маси, що ускладнює стабільне функціонування комбайна. У таких випадках постає необхідність в оперативному адаптуванні встановлених налаштувань до змінених умов, щоб уникнути перевантаження окремих компонентів, знизити втрати зерна та забезпечити якісне обмолочування.

Одним із ключових критеріїв правильного вибору режиму роботи комбайна є забезпечення стабільної подачі хлібної маси в розрахунку на одиницю часу (наприклад, на секунду), а також мінімізація втрат зерна під час збирання.

Сучасні автоматичні регулятори, встановлені у системі молотарки, дозволяють підтримувати постійну секундну подачу хлібної маси. Це дає змогу зберігати сталий кінематичний режим роботи основних робочих органів, що особливо важливо в умовах нерівномірного навантаження. Ефективна система автоматичного регулювання повинна не лише забезпечувати постійність подачі, а й оперативно реагувати на зміни зовнішніх умов, зберігаючи при цьому мінімальний рівень похибки регулювання. Такий підхід дозволяє підвищити надійність і довговічність техніки, а також покращити загальну продуктивність комбайна.

Так само техніка, яка використовується протягом тривалого періоду, потребує удосконалення та покращення характеристик окремих компонентів, що

зазнають значних навантажень. Зокрема це стосується автоматичного завантаження хлібної маси в умовах суттєвої нестабільності врожаю. Значна нерівномірність урожайності вздовж гону призводить до коливань і високої динамічності роботи окремих механізмів, які мають обмежені запаси міцності або майже не мають їх, що негативно впливає на надійність функціонування техніки.

Технологічний режим роботи зернозбирального комбайна визначається низкою чинників, серед яких: швидкість руху машини по полю, частота обертання валів робочих механізмів і вала двигуна, обсяг подачі хлібної маси та крутні моменти на основних робочих валах.

Система автоматичного регулювання виявляє невідповідність між необхідною та фактичною подачею, спостерігаючи відхилення секундної подачі або іншого пов'язаного з нею параметра від встановлених стандартних значень, визначених на основі показань датчиків. До таких параметрів можуть належати: товщина шару хлібної маси під транспортером жнивarki, крутні моменти на валу молотильного барабана чи приводі транспортера, а також положення підпружного молотильного пристрою.

З огляду на недостатню кількість техніки, стислі строки збирання врожаю та високу втомлюваність комбайнерів, зумовлену необхідністю виконання ручних операцій, виникає потреба в розробці системи автоматичного управління процесом завантаження хлібної маси. Така система має забезпечити усунення недоліків наявних рішень та підвищення ефективності збирання врожаю.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ. ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ РУХУ КОМБАЙНА В УМОВАХ ЗМІНИ ЗАВАНТАЖЕННЯ

Система автоматичного управління рухом комбайна при зміні навантаження хлібною масою призначена для використання на зернозбиральних комбайнах, призначених для збирання різних зернових культур, таких як пшениця, жито, ячмінь, овес та інші. Умови роботи комбайнів в сучасних умовах відрізняються тим, що, у зв'язку з реформуванням економіки, агротехніка вирощування цих культур в даний період відхиляється від рекомендованої.

Для досягнення високого врожаю зернових культур необхідно дотримуватися всіх рекомендацій щодо їх вирощування. Однак в сучасних умовах не завжди можливо виконати ці рекомендації через об'єктивні обмеження або те, що технології виконуються недостатньо якісно.

1.1 Опис комбайна

Зернозбиральний комбайн "СК-5 «НИВА» є самохідним та складається з наступних компонентів: жниварка з похилою камерою, молотарка, чи копичник подрібнювача, бункер з вивантажувальним пристроєм, ходова частина з переднім та заднім керованими мостами та варіаторами швидкості, двигун, кабіна з площадкою керування, а також електричне та гідравлічне обладнання. Для підбору валків комбайн також має підбирач.

Процес роботи комбайна протікає наступним чином: ділянки розділяють смуги хліба, забираючи їх у жниварки з рівною шириною захоплення. Планки мотовила піднімають стебла партіями і подають їх до ріжучого апарата, де вони обрізаються. Після обрізання стебла переходять на шнек. Витки шнека переміщують стебла до центру жниварки, де їх захоплюють пальці механізму, який піднімає їх, і перевозить до центрального нахилу транспортера, який подає масу в молотильний апарат для обмолоту.

На даному етапі, бички барабана розділяють зерно від колосків та частково очищують його під час проходження стебел через розрив між барабаном та нерухомим підбарабанням. Велика частина зерна (70-90%), разом із частинками плевел і оболонки, просівається через отвори підбарабання та потрапляє на транспортну дошку. Решту матеріалу, який залишився (включаючи соломку, полову, макуху та зерно), барабан молотильного апарата викидає з великою швидкістю на бітер. Бітер зменшує швидкість цієї маси (його окружна швидкість становить 17 м/с) і направляє її під гострим кутом на передній каскад клавішею соломотряса. На клавішах, особливо на передніх каскадах, обмолочена маса потужно перемішується, і з неї виокремлюється зерно. При цьому відбійний бітер, взаємодіючи з пальцевими ґратами, сприяє подальшому відокремленню зерна від обмолоченої маси.

Соломотряс виконує функцію поділу маси на соломку та зерно з дрібними домішками. Зерно з невеликими домішками легко проходить через виразні отвори перфорованих ґрат клавіш, тоді як соломка та великі її фрагменти (макуха) переміщуються в напрямку виходу з молотарки посередництвом ґратів. Потім, зуби соломонабивача виштовхують соломку в підпресовочну камеру, і після цього в копичник.

Зерно та невеликі домішки, які були відокремлені соломотрясом, направляються по нахиленим днам, закріпленим під ґратами третього і четвертого рівнів кожної клавіші, на транспортну дошку. Зерно та невелика кількість матеріалу, які просочилися через проміжки підбарабання, відбійних ґрат і перфорованих ґрат соломотряса, опиняються на стрясній дошці. Під час переміщення по дошці, купа розділяється - зерно та важкі домішки опускаються, тоді як легкі та великі соломисті домішки піднімаються. Потім купа просочується на пальцеві ґрати, де вона розділяється на дрібну та велику фракції. Дрібна фракція падає на верхню решітку очищення. Велика фракція, за допомогою повітряного потоку, створеного вентилятором, переміщується на центральну решітку.

Зерно просочується через відкриті просвіти верхньої решітки та спадає на нижню решітку. Після очищення, зерно, яке пройшло через нижню решітку, рухається вниз вздовж нахилу дошки і потрапляє в жолоб шнека. Після цього зерно подається зерновим елеватором у бункер. Після того, як бункер заповнений, комбайн активує вивантажувальний шнек, і зерно вивантажується в кузов автомобіля.

Незароблені колосся спускаються на продовжувач решіт та проходять через відкриті просвіти, потрапляючи в жолоб колосового шнека. Під решетом розташований потік повітря від вентилятора. Легкі домішки, які зачіпив струмінь повітря, а також великі домішки, які не пройшли через відкриті просвіти продовжувача, направляються на лоток половонабивача. Колосовий елеватор переносить їх у жолоб верхнього колосового шнека. Потім домішки опускаються на відбійний бітер, який переносить їх до барабана, який далі передає домішки до молотильного апарата.

Збоїна та полова, які були виділені під час очищення комбайна, направляються через продовжувач решіт на спеціальний лоток. Половонабивач, який працює на тих же принципах, що і соломонабивач, транспортує масу в камеру копичника. Полова та макуха збираються на дні передньої частини камери і не змішуються з соломною. Копичник має вікна на боках для виходу повітря. Після того, як копичник заповнюється, комбайнер, натискаючи на педаль, активує механізм вивантаження і вивантажує копицю на землю.

1.2 Обґрунтування вибору теми

Відсутність необхідної кількості зернозбиральної техніки та тривалий строк експлуатації призводять до надмірного навантаження фізичних сил працівників, які беруть участь у процесі збирання. У таких умовах практично неможливо керувати комбайнами вручну. Водночас автоматичний режим керування стає практично недоступним через неполадки систем, які були передбачені в проекті. Відновлення цих систем не призводить до задовільних

результатів через їхні недоліки. Ці недоліки виявлялися раніше, але в сучасних умовах агротехніки вони стають практично неефективними. Нерівномірна врожайність уздовж поля призводить до коливальних рухів комбайна, що надмірно навантажує двигун, варіатори та інші важливі вузли. Недовгий режим роботи, особливо для комбайнів з обмеженим ресурсом, може призвести до їхнього виходу з ладу.

Система автоматичного керування рухом комбайна, яка працює в умовах зміни завантаження хлібною масою, була покращена і позбавлена таких недоліків. Зокрема, в цій системі сигнали осереднюються і вирішують проблеми динамічних перевантажень відповідних вузлів машини, забезпечуючи якісне збирання та обробку маси в комбайні. Крім того, ця система створює нормальні умови для роботи комбайнера, який може фокусуватися на регулюванні, а не на контролі ефективності роботи вузлів. Система автоматичного завантаження також гарантує високу якість процесу.

Під час розробки потрібно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз наявних технічних рішень і обґрунтувати вибір принципу систем автоматичного регулювання.
2. Сформулювати вимоги до датчиків хлібної маси.
3. Провести обзир наявних датчиків хлібної маси та розробити принцип створення нового пристрою.
4. Розробити датчик для вимірювання хлібної маси.
5. Розробити виконавчий механізм для системи автоматичного регулювання.
6. Визначити вимоги до системи автоматичного регулювання хлібної маси.
7. Розробити функціональну, принципову та структурну схеми системи автоматичного регулювання.
8. Описати послідовність робіт, пов'язаних із системою автоматичного регулювання хлібної маси.

2 ІСНУЮЧІ РІШЕННЯ І ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПІВ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ КОМБАЙНА ПРИ ЗМІНІ НАВАНТАЖЕННЯ

2.1 Автомати завантаження зернозбиральних комбайнів

Однією з ключових умов для ефективної та продуктивної роботи зернозбиральних комбайнів є досягнення оптимального та рівномірного навантаження на робочі органи молотарки. У контексті розробки систем автоматичного регулювання подачі хлібної маси до молотилки зернозбирального комбайна постає суттєве питання щодо вибору параметра, який буде піддаватися регулюванню, оскільки прямо виміряти саму подачу є практично неможливим.

Внаслідок різних наукових досліджень було встановлено, що найбільш оптимальними параметрами для використання в системах автоматичного регулювання подачі хлібної маси в похилій камері жнивarki є величина крутячого моменту на валу молотильного барабана.

Масовий потік, який подається в молотарку, може бути розрахований за допомогою такого математичного виразу:

$$q = \frac{B v_k G}{360}, \quad (2.1)$$

де B – ширина захвату комбайна, м;

v_k – швидкість руху, км/год;

G – вага рослинної маси, ц/га.

З формули (2.1) видно, що при зміні врожайності G хлібної маси швидкість руху машини повинна змінюватися відповідно до гіперболічного закону, як показано на рисунку 2.1. Крім того, величина зміни швидкості руху комбайна $\Delta v_k''$ при низькій врожайності G буде більшою, ніж при високій врожайності $\Delta v_k'$, якщо відхилення врожайності ΔG від заданої величини буде однаковим.

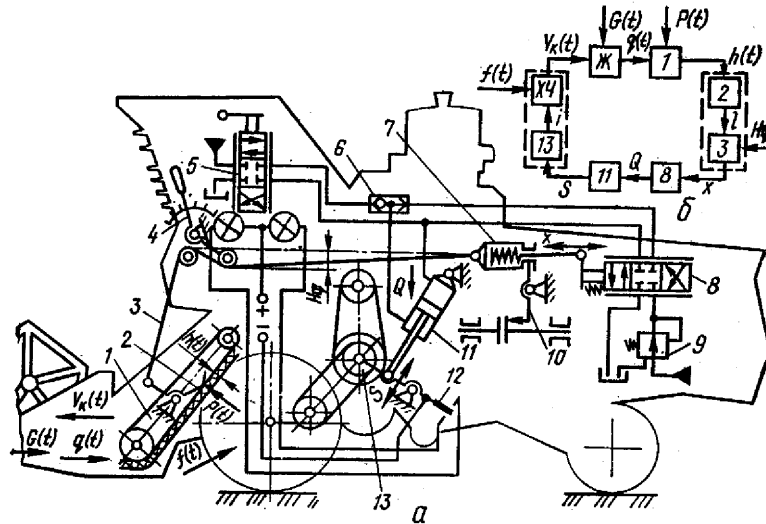


Рисунок 2.1 – Принципова схема (а) і функціональна (б) схема системи автоматичного керування рухом комбайна при зміні завантаження хлібною масою

1 - похила камера; 2 - датчик подачі; 3 - гнучка тяга; 4 - задатчик подачі; 5 - кран ручного керування; 6 - гідроперемикач; 7 - пружинний компенсатор; 8- розподільник; 9 - клапан редуційний; 10 - механізм вимикання; 11 - гідроциліндр; 12 - перемикач сигналізації крайніх положень варіатора; 13 - варіатор; Ж - жниварка; ХЧ - ходова частина.

Система автоматичного управління рухом комбайна в умовах зміни завантаження хлібною масою (рис. 2.1) включає в себе датчик подачі 2, який має форму вала та спирається трьома полозками на нижні галузі ланцюгів транспортера похилої камери 1. Важіль вала з'єднаний з плунжером розподільника 8 через гнучкий трос 3 і пружинний компенсатор 7. Розподільник живиться від зливальної магістралі гідропідсилювача рульового керування через редуційний клапан 9, який регулює тиск у системі. Пружина розподільника і пружинний компенсатор 7 забезпечують відсутність люфтів у системі передач та притискають полозки датчика подачі 2 до ланцюгів похилої транспортера жнивarki. Масло, під тиском від золотника, подається до гідроциліндра 11 для керування варіатором 13 ходової частини комбайна. Регулювання подачі хлібної маси досягається за допомогою ручки 4, яка налаштовує регулятор Hq на задану величину.

Зміни у кількості маси $q(t)$, яка поступає в молотарку, призводять до зміни товщини $h(t)$ в похилій камері і передаються плунжеру розподільника.

Згідно зі зміною подачі масла в гідроциліндр 11, передатковий варіатор ходової частини і швидкість комбайна v_k змінюються. Сигнали про граничні положення гідроциліндра і варіатора сигналізуються через лампочки на пульті управління комбайном, що вказує на потребу змінити головну передачу ходової частини комбайна. Гідроперемикач 6 дозволяє змінювати передачу варіатора як автоматично, так і вручну за допомогою розподільника 5, і кулісний механізм 10 з'єднує муфту зчеплення трансмісії з розподільником 8, поліпшуючи процес перемикання передач під час руху з місця. Ця система автоматичного регулювання подачі хлібної маси в молотарку зернозбирального комбайна має вже відпрацьовану конструкцію і встановлюється на промислових екземплярах комбайна СК – 5.

2.2 Пристрій контролю завантаження молотарки регулюванням крутного моменту на валу молотильного барабану

Момент, що діє на вал молотильного комбайна, залежить від кількості подачі хлібної маси, оскільки він пропорційний цій величині. Це обумовлено тим, що витрата потужності на обмолот хлібної маси обчислюється за відомою формулою, яка має вигляд:

$$75N = \frac{qv^2\sigma}{g(1-f)}, \quad (2.2)$$

де $v\sigma$ – кругова швидкість молотильного барабана;

g – прискорення сили тяжіння;

f – коефіцієнт, що враховує опір перетиранню маси в підбивці.

З формули (2.2) можна визначити, що витрата енергії (і, відповідно, момент, який обертає барабан), при постійній швидкості обертання барабана, залежить не лише від обсягу подачі, але також від значення коефіцієнта f . Цей

коефіцієнт враховує різноманітні фактори, включаючи зміни фізико-механічних властивостей обмолочуваної маси, і зокрема її вологість.

Датчик моменту, що крутить вал барабана, має перевагу у врахуванні зміни фізико-механічних властивостей хлібної маси порівняно з датчиком товщини шару. Однак, важливим недоліком використання датчика моменту як параметра регулювання є той факт, що зміни подачі в молотарку комбайна, що ріже, будуть реєструватися датчиком на валу барабана з певною затримкою часу, яка називається часом чистого запізнювання. Значення цього часу запізнювання може становити до 1,25 секунди.

Рисунок 2.2 демонструє принципову схему автоматичного пристрою для регулювання завантаження молотарки на основі зміни моменту, що крутить вал

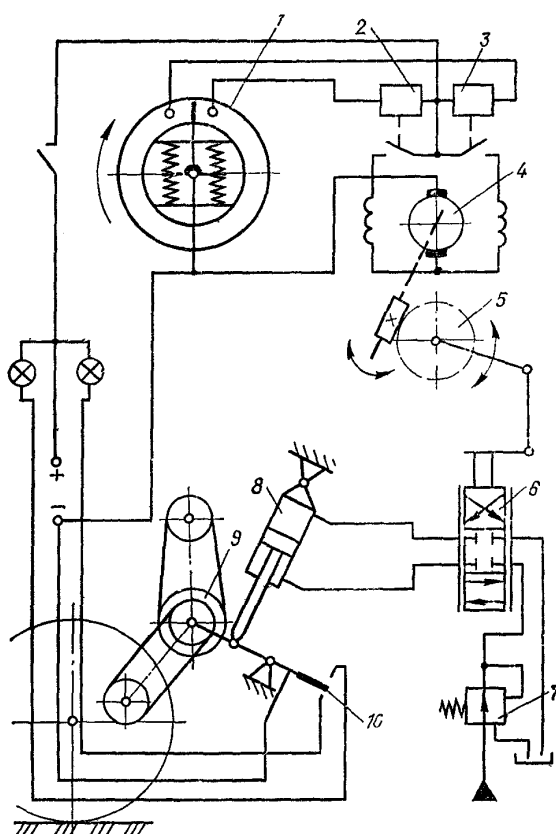


Рисунок 2.2 – Принципова схема регулятора

- 1 – датчик обертового моменту; 2 і 3 – електромагнітне реле; 4 – електродвигун;
5 – редуктор; 6 – розподільник; 7 – клапан редукційний; 8 – гідроциліндр; 9 – варіатор;
10 – перемикач сигналізації крайніх положень варіатора

барабана. Згідно з формулою (2.2), момент на валу барабана збільшується пропорційно збільшенню завантаження молотарки масою, а також залежить від вологості маси, яка враховується коефіцієнтом f .

Для вимірювання зміни моменту, що крутить вал барабана, використовується датчик у формі шківів, що функціонує як пружинний ротаційний динамометр і знаходиться в системі передачі моменту від двигуна до вала барабана. Зі зміною моменту на валу барабана ковзний контакт датчика спричиняє замикання ланцюга живлення для реле 2 або 3. Ці реле керують роботою реверсивного двигуна 4, який взаємодіє з гідророзподільником 6 через редуктор 5. Виконавчі пристрої, такі як гідроциліндр 8 і варіатор 9 ходової частини комбайна, мають аналогічну конструкцію і принцип роботи, як у автоматичного пристрою для регулювання завантаження молотарки на основі зміни товщини шару маси.

2.3 Перспективи подальших робіт по автоматизації завантаження комбайнів

Раніше розглянуті методи стабілізації подачі, які відрізняються за технічними характеристиками та вибором параметра регулювання, не забезпечують повністю ефективного запобігання забиванню молотарки. Це відбувається через запізнювання сигналу від датчика про появу підвищених порцій хлібної маси в барабані, недостатню чутливість або неправильну реакцію використовуваних датчиків на зміни фізико-механічних властивостей хлібної маси, яку обмолочують, і інші фактори.

Сучасний розвиток робіт щодо автоматизації технологічних процесів у самохідних збиральних комбайнах спрямований на кілька основних напрямків: виявлення додаткових параметрів регулювання та факторів, що впливають на процес обмолоту, а також встановлення оптимальних режимів роботи транспортних пристроїв, соломотряса і очищення зерна.

Незважаючи на те, що розроблені системи автоматичного регулювання завантаження молотарки значно покращують технологічний процес збирання, точність стабілізації подачі в таких системах поки не досягає показників, кращих за 10%. Ця обмеженість визначається інерційністю самого обладнання. Здійснення роздільного регулювання поступальної швидкості комбайна та швидкості похилого транспортера виявилось досить ефективним на практиці.

Технологічний процес збирання, що виконується комбайнами, залежить від багатьох факторів, іноді неможливо ефективно реагувати на них, вимірюючи лише один параметр. Наприклад, система автоматичного регулювання завантаження комбайна за двома параметрами - завантаженням двигуна (основне регулювання) і завантаженням барабана молотарки (додаткове регулювання), може послужити прикладом. У цьому випадку поступальна швидкість агрегату може збільшуватися лише в тому випадку, коли і двигун, і молотарка завантажені нижче свого оптимального рівня.

При оптимальному завантаженні одного з регульованих об'єктів (без впливу іншого) збільшення поступальної швидкості комбайна припиняється. А в разі перевантаження одного з об'єктів, незалежно від величини завантаження іншого, поступальна швидкість агрегату зменшується до моменту, коли завантаження першого регульованого об'єкта досягає заданої величини.

У цьому сценарії момент, що крутиться на валу барабана, служить параметром для регулювання завантаження молотарки, тоді як задросьльований тиск двигуна використовується як параметр для регулювання завантаження двигуна. Зазначено, що задросьльований тиск двигуна проявляє лінійну залежність від навантаження.

Схеми пристроїв для регулювання завантаження комбайна, розглянуті раніше, в першу чергу спрямовані на автоматичне збереження встановленого комбайнером рівня подачі, який визначається його особистим досвідом. Важливо відзначити, що автоматичний пристрій не здатний самостійно вибирати оптимальний режим роботи, а лише зберігає заданий рівень, і ця особливість є основним недоліком цих регуляторів.

Наступним кроком в розвитку цих робіт будуть системи автоматичного регулювання, які здатні вибирати та підтримувати стійкий рівень регульованого параметра - завантаження, навіть при постійних змінах умов роботи без потреби в активному втручанні комбайнера. Ці системи будуть обладнані кількома каналами вимірювання та відповідними регулюючими пристроями, і вони будуть здатні до автоматичної оптимізації всього технологічного процесу збирання в цілому.

Маючи на увазі умови модернізації техніки і прагнучи до мінімізації праці та фінансових витрат, розумним є впровадження системи керування з найменшою модифікацією існуючих вузлів комбайну "Нива", а також використання простого рішення для задачі вимірювання та керування. З цієї точки зору, найбільш доцільним є впровадження системи керування на основі завантаження хлібною масою. В цьому контексті необхідно вирішити завдання покращення точності вимірювання хлібної маси та визначення її середнього значення. Однак доцільним також є створення більш сучасного датчика хлібної маси, інструмента для осереднення даних з нього, та пристрою, що змінює швидкість руху комбайна.

Розумніше лишити гідравлічну виконавчу систему і варіатори без змін. Датчик та керуючий пристрій краще реалізувати як окремі блоки, які можна легко встановити на комбайні.

3 ОПИС СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ РУХУ КОМБАЙНА

3.1 Розробка функціональної схеми системи автоматичного керування швидкістю руху комбайна

Зернозбиральний комбайн "Нива" представляє собою весьма складний регульований пристрій, коли йдеться про автоматичне управління завантаженням комбайна зерною масою. Цей процес може бути зображений у вигляді, як показано на рисунку 3.1.

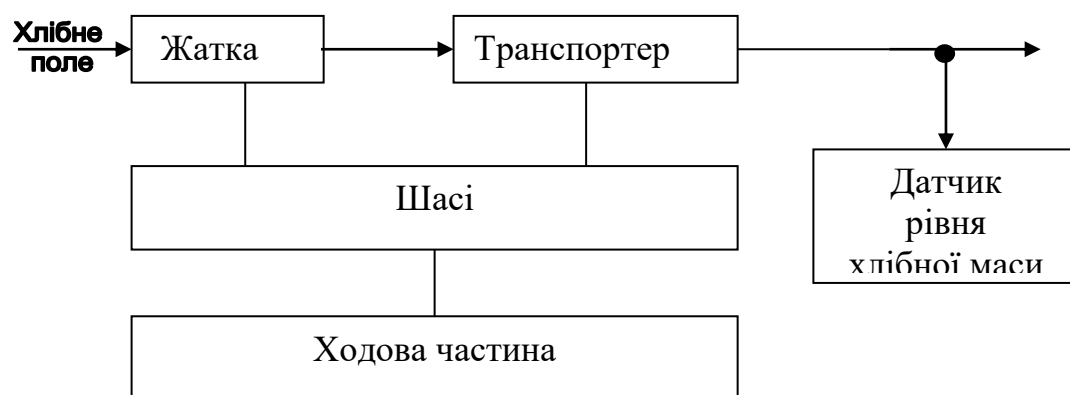


Рисунок 3.1 – Регульований об'єкт

Зерносорочний комбайн "Нива" видаляє зернову масу з поля за допомогою жатки та направляє її на транспортер для подальшої обробки в технологічному процесі. У цьому випадку матеріальний потік через регульований об'єкт проходить лише через два основних компоненти комбайна, а саме жатку та транспортер. Режим збору визначається швидкістю руху жатки та транспортера вздовж поля, і цей рух забезпечується за допомогою рухомої частини комбайна і твердого кріплення на ньому жатки та транспортера. Таким чином, щодо регулювання завантаження комбайна зерною масою, регульований об'єкт включатиме в себе чотири складові: жатку, транспортер, шасі та ходову частину. Жатка складається зі зварного корпусу, двигуна, ріжучого пристрою, шнека та механізму приводу. Корпус жатки кріпиться шарнірно на нахилі в трьох точках: на центральному шарнірі 1 (рис. 3.2) та на підвісках 3 і 7. Для коригування нахилу жатки щодо молотарки підвіску 7 можна

регулювати вздовжню. У нижній частині корпусу встановлені копіюючі башмаки, які виступають як передня опора для жатки при однофазному методі збирання з урахуванням рельєфу поля. Башмаки можна розташовувати в одному з чотирьох положень для регулювання висоти врізання стебел.

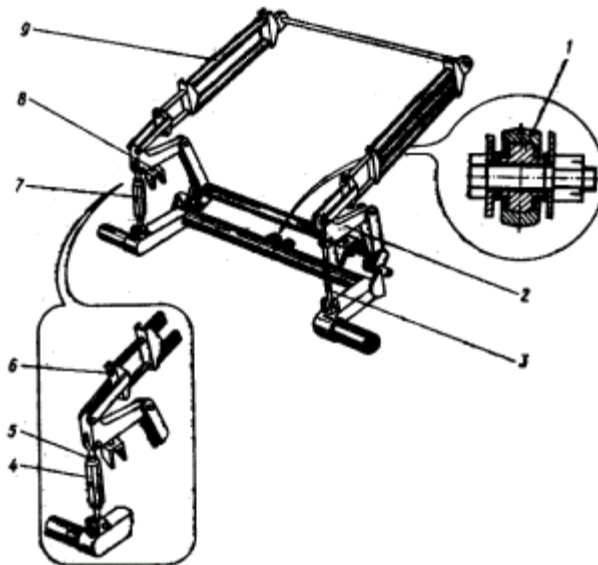


Рисунок 3.2 – Механізм зрівнювання жатки

1 – центральний шарнір; 2 – важіль; 3 – нерегульована підвіска; 4 – регульовальна гайка; 5 – контор-гайка; 6 – натяжний болт; 7 – регульовальна підвіска; 8 – упор важеля; 9 – пружинний блок.

Збалансована система жатки - це механічний механізм, оснащений пружинними блоками. Кількість цих пружин у блоку залежить від ширини захоплення жатки. Мотовило відводить стебла культури до різального апарата і шнека і складається з труби, на якій розташовані перекреслені кріплення з променями. На останніх встановлені регульовані граблі, які можна налаштовувати по нахилу. Привід мотовила реалізується через використання клинового гідрофікованого варіатора, двох ланцюгових передач і запобіжної фрикційної муфти. Для надійної роботи варіатора налаштовують тягу ремня.

Різальний механізм жатки (рис. 3.3) служить для зрізання рослин при використанні однофазного методу збору і складається з пальцевого бруса та ножа. Ніж різального механізму рухається в зворотно-поступальному режимі завдяки кривошипно-шатунному механізму.

Для правильної роботи різального механізму необхідно налаштувати ніж таким чином, щоб він вільно переміщався з одного крайнього положення в інше під час ручного обертання кривошипно-шатунного механізму. У цей момент осі сегментів на протирізальних пластинах повинні знаходитися у точному збігу у крайніх положеннях ножа.

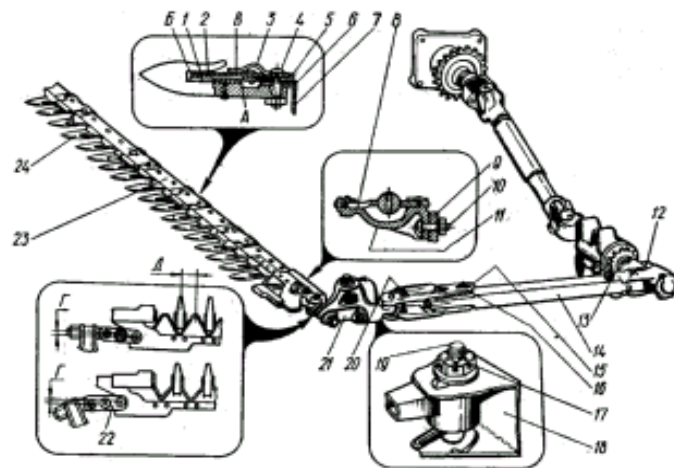


Рисунок 3.3 – Різальний апарат жатки

1 – протирізальна пластина; 2 – сегмент; 4, 10 – болт; 5 – пластина тертя;
6, 9 – прокладки; 7 – кутники; 8 – головка ножа; 11 – напрямна; 12 – кривошипно-шатунний механізм; 13, 15, 17, 20 – гайки; 14 – шатун; 16 – щічка шатуна.

Шнек виконує функцію транспортера для жатки і складається з циліндричного корпусу, на зовнішній поверхні якого прикріплені спіральні стрічки. В середині шнека розташований ексцентриковий механізм з пальчиковими вставками. Повороти шнека здійснюються за допомогою ланцюгової передачі та запобіжної фрикційної муфти. Для досягнення однорідної подачі хлібної маси від шнека до транспортера в похилій камері, необхідно налаштувати технічні проміжки А і Б. З метою запобігання втрат зерна через щілини на місцях з'єднання корпусу жатки з похилою камерою, встановлені захисні щитки, включаючи бокові та перехідний, які мають обкантований ущільнювальний пас. Бокові щитки прикріплені до пружинних штанг і можуть бути встановлені у робочому або монтажному положенні за допомогою шплінта. Протилежний кінець бокових щитків опирається на днище похилої камери завдяки пружинним штангам, верхні кінці яких вставлені в отвори кутників, які прикріплені до похилої камери.

Похила камера призначена для переміщення хлібної маси від жатки до молотарки. Вона складається з основи, всередині якої розташований ланцюговий транспортер типу "плаваючий," а також верхнього та нижнього валів. Нижній вал є підпружиненим як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямку, створюючи сприятливі умови для рівномірного подавання хлібної маси в молотарку.

Для запобігання втрати зерна через щілини в точках з'єднання похилої камери з корпусом молотарки, встановлені ущільнювальні стрічки: верхня та нижня прикріплені до корпусу молотарки, а бокові - до корпусу похилої камери. У місцях прилягання ущільнювальних стрічок не допускаються проміжки.

Залежно від виду рослин та особливостей збору, жниво може бути оснащено або фіксованим, або стандартними подільниками стебел. У випадку нерегульованого подільника стебел використовуються бокові сторони корпусу жатки та продовжені знімні носки.

Ходова система комбайнів, що складається з чотирьох коліс і розташована симетрично відносно осі молотарки, включає в себе такі основні компоненти: 1) передні мости, 2) задні мости, 3) механізм керування.

Рама молотарки отримує опору в трьох точках від ходової системи: через продовжні бруски, рама прикріплена до переднього моста та вісі кронштейна, який має шарнірне з'єднання з балкою заднього моста. Ця трьохточкова система з'єднання має перевагу в тому, що рама молотарки не піддається обертальним навантаженням.

Широкий слід ведучих коліс та значна база ходової системи, разом із розташуванням центру ваги комбайна близько до центру ваги опорного трикутника, сприяють раціональному розподілу навантаження на колеса і забезпечують високу стійкість комбайна як у поперечному, так і в поздовжньому напрямку.

Система колісного приводу, яка включає ведучі колеса великого діаметра та високі грудкозачеплювачі, демонструє високу прохідність, що відповідає вимогам для використання комбайнів на більшості зон для збирання зернових культур.

Проведений аналіз можливих методів керування даним об'єктом в встановлених умовах показав, що найбільш раціональним варіантом є впровадження принципу керування за відхиленням. Для його реалізації необхідно встановити датчик рівня маси матеріалу та пристрій для опрацювання сигналу з цього датчика. Основний керуючий контур системи включатиме звичайні компоненти, характерні для цього принципу керування, включаючи задавач, блок порівняння, коригуючий пристрій, підсилювач, виконавчий механізм та регулюючий орган. Можливо, розумно використовувати вже встановлений регулюючий орган на самому комбайні, який включає в себе варіатор, гідрозолотник та гідроциліндр.

Комбайн "Нива" при керуванні рухом у варіабельних умовах завантаження хлібною масою можна представити як систему, яка включає в себе об'єднання функціональних компонентів, зображених на схемі, показаній на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 – Узагальнений регульований об'єкт

Потужність для приводу ходової частини постачається від шківів, який розташований на правому кінці колінчастого вала двигуна, і подається до клинопасового варіатора. В синергії з коробкою передач, варіатор забезпечує можливість регулювання швидкості руху комбайна в діапазоні від 1,04 до 18,7 км/год, при цьому в межах однієї передачі швидкість може бути змінена варіатором безступінчато. Схема варіатора комбайнів СК-5 представлена на рисунку 3.5. Цей механізм включає в себе основний блок варіатора, який складається з маточини, трьох дисків, вилки та гідроциліндра. В об'єднаній конструкції маточини знаходяться зовнішні диски 14 і 17, які прикріплені жорстко, та середній диск 15, який може вільно переміщатися вздовж маточини.

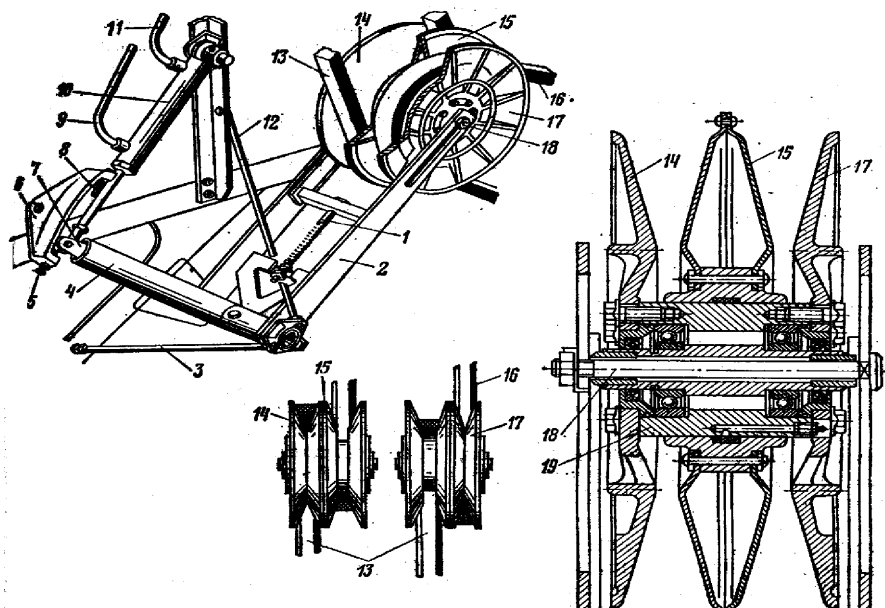


Рисунок 3.5 – Варіатор ходової частини комбайна СК-5

1 - натяжний гвинт; 2 - вилка; 3 і 12 – розтяжки; 4 - важіль вилки; 5 і 8 - настановні гвинти; 6 - кронштейн; 7 - упор; 9 і 11 - шланги; 10 - гідроциліндр; 13 і 16 ремені; 14,15 і 17 диски; 18 - стяжний болт; 19 - маточина.

Всі три диски разом утворюють дворучну пулю. На обидва циліндри надіті однакові ремені 13 і 16, при цьому перший ремінь також прикріплений до шківів двигуна, а другий - до шківів привідного вала коробки передач. Блок варіатора розташований на штанзі 5 і 8; ці болти, а також обмежувач 7, встановлений на штоку гідроциліндра 10, обмежують хід переміщення блоку варіатора.

Якщо використовуючи гідроциліндр, перемістити вилку вниз до межі, то відстань між блоками варіатора і шківом на колінчастому валу двигуна збільшиться, водночас відстань між блоком варіатора і шківом на валу коробки передач зменшиться. Це призведе до натягнення ременя 13, який відтягне середній диск 15 убік і перемістить його на найменший робочий струмінь варіатора. У той же час ремінь 16 буде розслаблений і перейде на найбільший діаметр робочого струміння варіатора. В результаті цього зміниться частота обертання варіатора і швидкість руху комбайна збільшиться. Але якщо перемістити вилку вгору до межі, то це призведе до зменшення швидкості руху комбайна.

На рис. 3.6 показана схема функціонування системи автоматичного керування рухом комбайна у ситуаціях, коли навантаження від хлібної маси змінюється.

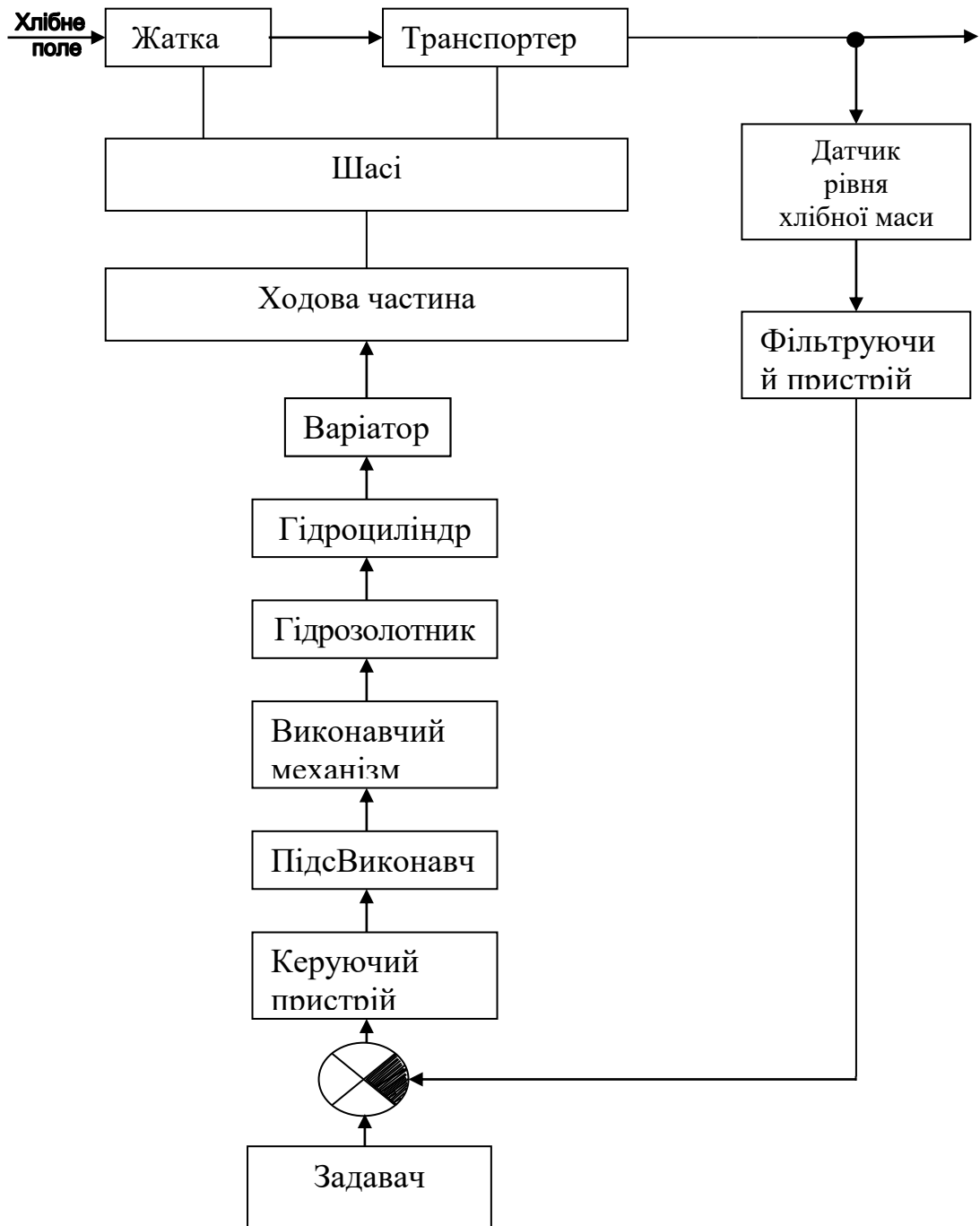


Рисунок 3.6 – Функціональна схема системи автоматичного керування рухом комбайна в умовах зміни завантаження хлібною масою.

Завдання щодо обсягу завантаження хлібної маси в систему встановлюється оператором комбайна через використання регулюючого пристрою. Ця величина залежить від різних факторів, таких як ступінь зрілості хліба, вологість, час доби і погодні умови, і може бути налаштована відповідно до якості обмолоту. Створений сигнал зі значенням завантаження хлібної маси порівнюється із реальним значенням, яке вимірюється датчиком. Сигнал від датчика хлібної маси проходить через

фільтруючий пристрій, і в будь-якому випадку, відмінність між сигналами від датчика та від задавача є діючим впливом на елементи головного контуру системи.

Змінюючи дану інформаційну величину, коректуючий пристрій налаштовує цей сигнал для отримання оптимальних керуючих сигналів. Цей сигнал підсилюється відповідно до амплітуди та потужності і передається виконавчому механізму, який впливає на гідрозолотник. Наприклад, якщо врожайність на конкретній ділянці поля зменшилася, датчик реєструє менше значення рівня хлібної маси. Це створює дію на елемент порівняння, і через ланцюг елементів головного контуру системи відбувається збільшення швидкості руху комбайна до досягнення бажаного завантаження хлібною масою. Навпаки, якщо врожайність на певній ділянці поля збільшується, керуюча дія, передана через ланцюг елементів, що включені в головний контур системи, буде зменшувати швидкість руху комбайна, поки не буде досягнуто бажаного значення сигналу датчика. Оскільки нерівномірність врожайності на протязі поля вирівнюється за допомогою фільтруючого пристрою в дуже короткі терміни, це допомагає уникнути динамічних навантажень, які можуть виникнути внаслідок мікронерівномірності врожайності на полі.

3.2 Обґрунтування вибору вузлів системи автоматичного керування швидкістю руху комбайна

До ключових компонентів даної системи відносяться датчик рівня хлібної маси, фільтруючий пристрій, задавач, коректуючий пристрій та елемент порівняння. З них особливо важливий є датчик рівня хлібної маси, оскільки від нього залежить ефективність усієї системи.

Розглянуті датчики рівня хлібної маси та інших агропромислових потоків не є належними для ефективного управління зернозбиральними комбайнами. Отже, вибір такого технічного пристрою має бути підходящим. По-перше, датчик рівня маси повинен задовольняти всі вимоги, які застосовуються до

технічних засобів автоматизації. Вимірювальні пристрої мають бути точними, маєм дуже низьку інерційність та високу надійність.

Ці вимоги до засобів вимірювання витрати можуть бути розширені відносно розходомерів. В сучасний час, вимоги до пристроїв для вимірювання об'єму та кількості рідин і газів стали дуже різноманітними і, в окремих випадках, важкими для виконання. Давайте розглянемо основні серед них.

1. Покращення точності вимірювань. Велика частина приладів, які призначені для вимірювання витрат та кількостей рідин і газів, входять до класу з точністю в межах 1-2. При припущенні, що більшість вимірів проводяться у середній частині шкали приладу, відносна похибка таких вимірів становить від 2% до 4%. З урахуванням нестабільності різних факторів, які впливають на вимірювання, фактична похибка може бути навіть вищою. Проте багато сучасних технологічних процесів, а також операції, пов'язані з продажем нафтопродуктів і газів, вимагають набагато більш точних вимірювань. Тому виникає потреба в розробці та створенні приладів, які мають клас точності 0,2-0,5.

2. Забезпечення стійкості вимірювань до зміни характеристик оточуючого середовища.

3. Збільшення надійності функціонування приладів. Постійний розвиток автоматизованих виробничих процесів призводить до посилення вимог до надійності та довговічності витратомерів і вимірників кількості. Підвищення ролі вимірювальних пристроїв у керуванні виробництвом вимагає їх надійного функціонування.

4. Покращення динамічних характеристик приладів. У минулому основні вимоги до вимірювальних приладів стосувались лише точності та надійності. Але сьогодні, з ростом потреби у вимірах великої зміни, підвищеною швидкістю технологічних процесів і використанням вимірювальних пристроїв у системах автоматичного керування, з'являються вимоги до покращення їхньої динамічної здатності. Це означає необхідність зменшення часу відгуку та підвищення частоти коливань вимірювальних пристроїв.

5. Значний спектр вимірюваних значень потоку.

6. Розширення меж вимірюваних параметрів речовини.
7. Різноманітність вимірюваних речовин.

При аналізі вимог до вимірювання витрат схожих матеріалів виділяється датчик, який спроектований для використання в гірничій та цементній промисловості та призначений для вимірювання об'єму матеріалу в замкнутому циклі подрібнення. З метою підвищення точності вимірювань, лопатки розміщені на концентрично розташованих валах, які пов'язані механічними передачами з пристроями для вимірювання кута обертання. Вихідні сигнали цих пристроїв послідовно підключені до входу інтегратора.

На малюнку 3.7 представлений пристрій для вимірювання об'єму матеріалу, який циркулює. Цей пристрій встановлюється у пісковому жолобі класифікатора 1 та включає кілька лопаток 2, які охоплюють весь широкий матеріал, який підлягає вимірюванню 3. Лопатки можуть ковзати по поверхні матеріалу, і вони розташовані на концентрично розташованих валах, які з'єднані за допомогою механічних передач 5 з валами перетворювачів 6 кута обертання, таких як феродинамічні перетворювачі. Виходи перетворювачів 6 кута обертання з'єднані послідовно і підключені до входу інтегратора 7. Вихід інтегратора з'єднаний із приладом, який реєструє результати вимірювань (на малюнку 3.7 цей прилад не показаний).

При надходженні пісків і води у жолоб класифікатора 1 створюється пульсуючий потік пульпи. За впливом матеріалу 3 лопатки 2 відхиляються від початкового вертикального положення під певним кутом, який залежить від висоти пульпи в пісковому жолобі класифікатора. Пульсації в потоці призводять до зміни висоти пульпи під кожною лопаткою, а, отже, і кута повороту кожної лопатки. Загальний кут повороту лопаток в кожний момент часу однозначно визначає миттєве значення висоти матеріалу на всьому перетині піскового жолоба.

Рух лопаток та валів 4, що обертаються, передається до перетворювачів 6 кута повороту через механічні передачі 5. Вихідна напруга перетворювачів пропорційна висоті матеріалу під лопатками. Оскільки виходи перетворювачів кута повороту з'єднані послідовно, напруга на вході інтегратора 7 відповідає

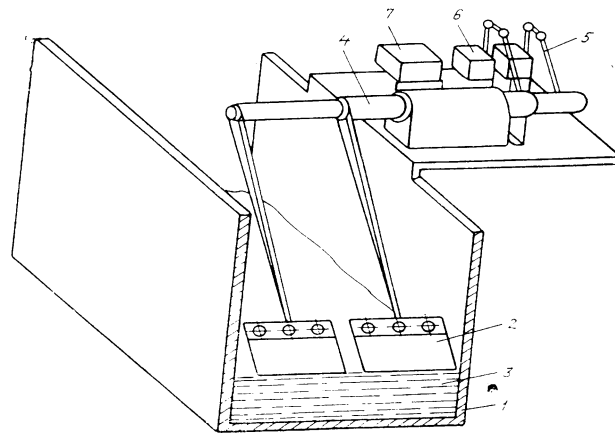


Рисунок 3.7 – Пристрій для виміру циркулюючого навантаження

1 – класифікатор; 2 – лоток; 3 – контрольний матеріал; 4 – вал;
5 – механічна передача; 6 – перетворювач; 7 – інтегратор.

сумі кутів повороту окремих лопаток та миттєвому значенню об'ємного розходу пульпи в пісковому жолобі. Миттєве значення результуючої напруги перетворювачів кута повороту, що постійно змінюється через пульсацію потоку, осереднюється інтегратором 7 постійної дії. Пристрій для реєстрації фіксує середнє значення об'ємної витрати пульпи, яка протікає в пісковому жолобі класифікатора. Оскільки кількість доданої вода в пісковий жолоб, вологість піску в класифікаторі та питома вага твердих часток практично не змінюються під час усереднення вихідної руди, то калібрування пристрою можна виконати безпосередньо в одиницях виміру масового розходу твердих часток.

Завдяки прямому приєднанню лопаток до концентрично розташованих валів, досягається репрезентативне вимірювання висоти матеріалу по всьому перетину з мінімальними зусиллями, що впливають на потік, що в свою чергу зменшує знос лопаток і попереджує їх поглиблення в пульпу. Пов'язаність концентрично розташованих валів за допомогою механічних передач з перетворювачами кута повороту усуває ковзання і негативну реакцію перетворювача кута повороту на компоненти, які повторюють рух лопаток. Послідовне з'єднання виходів перетворювачів кута повороту та їх підключення до входу інтегратора

безперервної дії сприяє підвищенню точності визначення висоти матеріалу і вилученню втрати інформації при пульсації циркулюючого навантаження.

На основі описаного вище датчика було створено пристрій для виміру витрат відкритих потоків, який показаний на рисунку 3.8. Цей винахід відноситься до галузі вимірювальної техніки і може знайти своє застосування в сільському господарстві, в пристроях для контролю та регулювання завантаження мобільних збиральних машин і стаціонарного обладнання для післязбиральної обробки сільськогосподарських продуктів.

Пристрій для вимірювання витрати продукту в відкритих потоках складається з лотка (1), який має кронштейни (2 і 3) на лівому та правому бортах. На цих кронштейнах закріплені дві секції датчиків (4 і 5). Кожна секція датчика має два концентрично розташованих вала. Внутрішній вал (6) входить у лоток на 0,4 шириною, а зовнішні вали (7) - на 0,1 шириною лотка. На кінцях цих валів розташовані лопатки (8) довжиною приблизно 3-4 висоти бортів лотка. Якщо в лотку відсутній матеріал (9), то лопатки опускаються до дна лотка і утворюють гострий кут щодо його подовжньої осі. Поворот лопаток відносно цієї осі може здійснюватися, наприклад, за допомогою встановленого важеля, який з'єднаний з лопатками (10) чи за допомогою вільного нарізного чи спеціального підшипника.

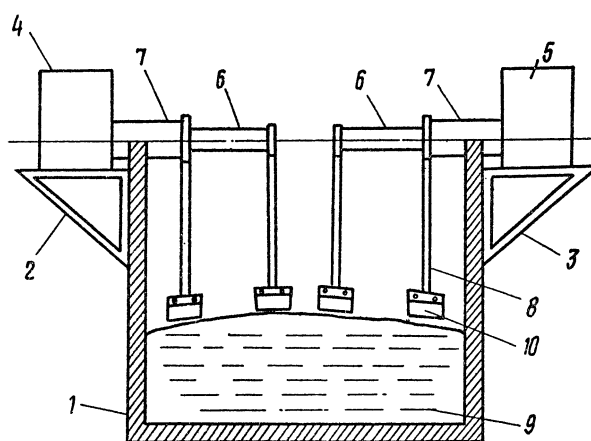


Рисунок 3.8 – Пристрій визначення витрат продуктів у відкритих потоках

1 – лоток; 2, 3 – секції; 4, 5 – датчики; 6 – внутрішній вал; 7 – зовнішній вал;
8 – лопатки; 9 – матеріал; 10 – лопатки.

Вали, які з'єднані механічними передачами, взаємодіють з перетворювачами кута повороту. Виходи цих перетворювачів подаються послідовно на вхід інтегратора, який, в свою чергу, підключений до приладу реєстрації. При подачі матеріалу (9) в лоток (1), кожна з лопаток (8) змінює своє положення, обертаючи вали (6 і 7) секцій (4 і 5) в залежності від товщини шару продукту. Кожен вал обертається за допомогою механічних передач, і цей оберт повідомляється перетворювачам кута, які витворюють напругу. На виході чотирьох послідовно з'єднаних перетворювачів формується сигнал, який пропорційний миттєвому значенню перетину матеріалу в лотку. Миттєві значення вихідного сигналу усереднюються інтегратором і вимірюються приладом реєстрації.

3.3 Обґрунтування вибору вторинного перетворювача

Другорядний перетворювач здійснює конвертацію кута повороту в електричний сигнал. Відзначається високою точністю, лінійністю характеристики та обмеженим діапазоном зміни кута.

Для виконання цієї конвертації використовують різні засоби, такі як потенціометричні сельсини, обертові трансформатори, цифрові перетворювачі, феродинамічні перетворювачі, ємнісні перетворювачі та індуктивні перетворювачі. Розглянемо особливості кожного з цих засобів.

3.3.1 Потенціометричний датчик

Потенціометричний датчик, також відомий як потенціометричний перетворювач, представляє собою електромеханічний компонент, який складається з дротового потенціометра та струмознімача. Вони підключені у певній конфігурації до джерела живлення та електричного навантаження. Зазвичай в якості джерела живлення використовують напругу постійного струму, і тому потенціометричні датчики відносяться до елементів без модуляції. Електричне навантаження для потенціометричного датчика може включати в себе вхідний опір підсилювача, реле, електромагнітний перетворювач та інші компоненти.

Потенціометричний датчик виконує функцію перетворення механічного руху, який може бути лінійним ($x(t)$) або кутовим $\alpha(t)$), чутливого елемента первинного датчика інформації на вихідний електричний сигнал відповідно до встановленого лінійного або нелінійного закону при квантуванні сигналу за певним рівнем. При великій кількості витків у потенціометрі і великому діаметрі проводу ($d \leq 0,05$ мм), ефект квантування вихідного сигналу зазвичай не розглядається як значущий.

Спосіб перетворення механічного переміщення на електричний сигнал визначається конструкцією датчика, з'єднанням з джерелом живлення та навантаженням, а також режимом роботи. У певних ситуаціях, для здійснення перетворення механічного руху в електричну напругу, використовується потенціометричний датчик, відомий як релейний потенціометр.

Потенціометричні датчики, які використовуються в системах автоматичного регулювання, славляться своєю простою конструкцією та легкістю в експлуатації. Проте, важливо зауважити, що вони стають менш надійними через наявність рухомого струмознімального елемента.

3.3.2 Сельсини

Сельсин – це особлива електрична машина змінного струму, складається зі статора і ротора, на яких розташовані однофазні або трифазні обмотки. У малопотужних сельсинах зазвичай трифазну обмотку розміщують на статорі, тоді як у потужних - на роторі. Однофазну обмотку живлять змінною напругою. Ефективне значення ЕРС у трифазних обмотках залежить від кута повороту ротора.

Сельсини споживають велику кількість потужності, потребують наявності джерела живлення змінного струму, яке відсутнє на багатьох комбайнах. Крім того, їх характеристика не є строго лінійною. Ці недоліки роблять їх використання у конструкціях неефективним.

3.3.3 Обертові трансформатори

Обертові трансформатори (ОТ) представляють собою високоточні електричні машини змінного струму, які здатні перетворювати кут повороту в електричну напругу. Зазвичай ОТ виконують перетворення кута в тригонометричні функції $\sin\alpha$ і $\cos\alpha$, тому їх також називають синусно-косинусними трансформаторами. У структурі обертових трансформаторів зазвичай присутні по дві розташовані окремо обмотки, зсунуті між собою на 90 електричних градусів, які вбудовані в пази як статора, так і ротора.

Статична характеристика пристрою на основі обертових трансформаторів подібна до тієї, що застосовується в пристроях на основі сельсінів, але має протилежний знак. Зауважимо, що обертові трансформатори відрізняються більшою точністю вимірювань у порівнянні із сельсинами, і їх похибка зазвичай становить від 1% до 3%. Проте, обидва типи трансформаторів мають схожі недоліки, і тому їх використання у конструкціях не завжди є доцільним.

3.3.4 Прецизійні обертові трансформатори

Прецизійні обертові (поворотні) трансформатори (ОТ) є компонентами з балансовою модуляцією несучої частоти. Обертові трансформатори представляють собою високоточні електричні машини змінного струму, створені з метою перетворення кута повороту ротора в електричну напругу. Амплітуда цієї напруги пропорційна самому куту, а також певній тригонометричній функції цього кута, і фаза напруги відповідає знаку кута повороту.

Трансформатори, які виконують перетворення тригонометричних функцій \sin і \cos кута, отримали назву синусно-косинусних обертових трансформаторів. Сам обертовий трансформатор складається з двох частин: статора і ротора, які створені з аркушів, зроблених з пермалою. У пазах як статора, так і ротора розташовані по дві розподілені обмотки, які взаємно зсунуті на 90 електричних градусів. Конструкція та технологія виготовлення синусно-косинусних обертових трансформаторів мають забезпечувати зміну коефіцієнта

взаємоіндукції між обмотками ротора та статора в повітряному зазорі відповідно до синусоїдального закону при повороті ротора. Системи автоматики використовують синусно-косинусні обертові трансформатори для точного вимірювання кутових відхилень та для генерації тригонометричних функцій в залежності від кута повороту, в залежності від включеної схеми.

3.3.5 Перетворювачі кут-код

У цифрових датчиках кутових переміщень використовується метод модуляції світлового або магнітного потоку під час переміщення кодуєчого диска. Цей диск має кілька доріжок, де взаємно чергуються вікна і перегородки, які реєструються перетворювачами. Інформацію з диска зчитують, рухаючись вздовж радіусу. Якщо розгорнути доріжки чотирирозрядного кодуєчого диска, то на ньому можна записати послідовність цифр у двійковому коді. Монтування перетворювачів головок на диску вздовж радіусу дозволяє зчитувати відповідне число для кожного положення кута повороту. Втрати точності виготовлення датчиків унеможливають практичне використання простих дисків з двійковим кодом. Тому для цього застосовують двійково-зсунуте кодування, де кожен розряд (за винятком першого) представлений двома підрозрядами (доріжками), такі як код Баркера або V-код. Основна ідея цього коду полягає у можливості вибору одного з двох значень для кожного розряду, залежно від значення попереднього розряду. Якщо попередній розряд дорівнює 0, то наступний символ визначається за першою доріжкою. У випадку, коли попередній розряд дорівнює 1, наступний символ вибирається з другої доріжки. Використання двійково-зсунутого кодування дозволяє уникнути помилок на межі розрядів.

Окрім розглянутих методів, для вимірювання кута повороту можна також використовувати потенціометричні датчики (реохорди), ємнісні, індуктивні, феродинамічні та інші типи перетворювачів. Однак ці методи характеризуються великою складністю, високою вартістю та вимагають значного кута повороту, і тому їх не можна рекомендувати для практичного застосування.

3.3.6 Розробка конструкції перетворювача

У зв'язку з обмеженнями існуючих засобів, для вимірювання цього конкретного кута необхідно розробити спеціальну конструкцію, яка зображена на рисунку 3.9.

Згідно з аналізом, можна створити індуктивний перетворювач для малих кутів, використовуючи осердя подібне до тих, які використовуються для виготовлення трансформаторів (як показано на рисунку 3.9). Для цього ми можемо взяти осердя типу ША-12 з товщиною набору 16 мм. На цьому склеєному осерді 1 розташовуємо обмотку 2, яка виготовлена з проводу ПЕВ-2 діаметром 0,12 мм. Замкнуту частину магнітопроводу ми нерухомо закріплюємо до корпусу приладу 3. Перемичку для даної трансформаторної сталі ми склеюємо та закріплюємо на вал вторинного перетворювача 4. Ділянки магнітопроводу, які взаємодіють між собою, механічно обробляються до отримання циліндричної поверхні. Між магнітними матеріалами залишається повітряний проміжок шириною 1,5 мм.

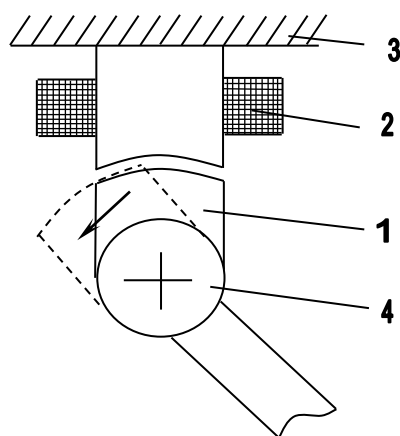


Рисунок 3.9 – Індуктивний перетворювач для малих кутів
1 – магнітопровід; 2 – індукційна обмотка; 3 – корпус приладу; 4 – вал вторинного перетворювача.

3.4 Обґрунтування вибору виконавчого механізму

Гідравлічний золотник виконує зворотні поступові рухи, тому раціональним було б обрати виконавчий механізм, який б здійснював аналогічні рухи, які властиві золотнику. Такі механізми не виробляються промислово в серійному виробництві, тому потрібно розробити такий виконавчий механізм самостійно.

Найбільш доцільно використовувати електромагнітний виконавчий механізм, але електромагніт на постійному струмі має нерівномірні характеристики тяги і не може бути використаний без додаткового вдосконалення. Тому необхідно розробити спеціальну конструкцію для досягнення необхідних параметрів.

Раціональним варіантом є використання конструкції з рухомим якорем, що знаходиться в циліндричній обмотці і має рухоме осереддя. Такі компоненти мають параметри, які показані на рисунку 3.10. Довга лінійна залежність між силою тяги (Н) та переміщенням дозволяє здійснювати плавні рухи золотника. На рисунку 3.11 представлена схема електромагнітного клапана для управління потоком агресивної рідини. В даній системі маємо кульовий запірний орган 1, який виготовлений з магнітного матеріалу і розташований на конічному сидлі всередині гільзи 2, що виготовлена з немагнітного матеріалу. Гільза 2 розташована в порожнині електромагнітної котушки 3, яка має зовнішній магнітопровід 4 і внутрішній магнітопровід 5. Кульовий запірний орган футерований резиною, що призначено для захисту його поверхні від впливу агресивного середовища. При введенні постійної напруги на електромагнітну котушку 3, кульовий запірний орган 1 переміщається вздовж гільзи, відкриваючи отвір у сидлі клапана.

Стискаюче зусилля, що діє на запірний орган.

$$F = KPH\text{grad}H \quad (3.1)$$

де K – постійний коефіцієнт; H – напруженість магнітного поля електромагнітної котушки; P – маса запірного органа; grad – градієнт напруженості H по осі цієї котушки.

Маса запірного органа для клапана певного розміру є сталою величиною, тому сила стискання F обчислюється на основі напруженості електромагнітного поля та її градієнту. Величини H і grad визначаються кількістю ампер-витків в електромагнітній котушці та її конструктивними особливостями.

Для визначення розмірів конструктивних елементів виконавчого пристрою проводилися експериментальні дослідження магнітного поля

електромагнітної котушки вздовж осі гільзи. На рисунку 3.10 показані графіки зміни напруженості магнітного поля (H) вздовж осі гільзи клапана при різних варіантах конструкції електромагнітної котушки. З цього рисунку можна

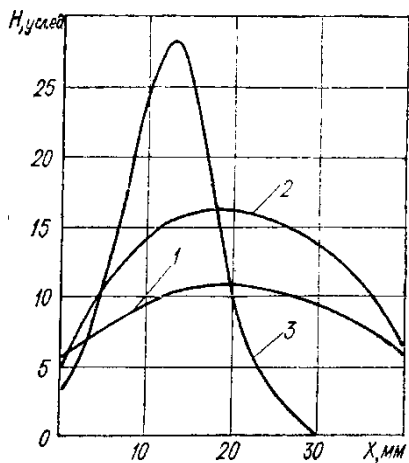


Рисунок 3.10 – Графіки зміни напруженості магнітного поля вздовж осі клапана.

1 – без магнітопроводу; 2 – з зовнішнім; 3 – з внутрішнім магнітопроводом.

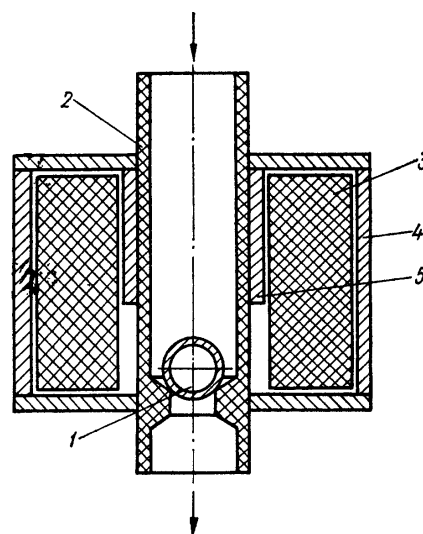


Рисунок 3.11 – Схема електромагнітного клапана.

1 – шаровий запірний орган; 2 – гільза; 3 – електромагнітна котушка; 4 – зовнішній магнітопровід; 5 – внутрішній магнітопровід

побачити, що напруженість магнітного поля в порожнині котушки без магнітопроводу (крива 1) змінюється плавно і відрізняється невеликою величиною. Тому стискальне зусилля, яке розвивається електромагнітною котушкою, є досить низьким. З використанням зовнішнього магнітопроводу (крива 2) досягається певне збільшення стискального зусилля, оскільки це призводить до збільшення напруженості та градієнта магнітного поля в порожнині котушки.

Після встановлення в верхній частині порожнини такої котушки внутрішнього магнітопроводу (крива 3), характер зміни напруженості різко змінюється. Максимальна напруженість в цьому випадку значно вища, приблизно вдвічі, ніж напруженість, яку отримуємо в порожнині електромагнітної котушки, яка обладнана лише зовнішнім магнітопроводом. Ця максимальна напруженість відповідає нижньому краю внутрішнього магнітопроводу. Градієнт напруженості магнітного поля залишається сталим в

у цьому діапазоні переміщення запірнього органа і міняє напрямок поблизу точки максимальної напруженості. За абсолютною величиною, градієнт напруженості в кілька разів перевищує значення, яке можна отримати за допомогою електромагнітних котушок без магнітопровода або зі зовнішнім магнітопроводом. Це призводить до значного збільшення стискального зусилля, що діє на запірний орган, без введення будь-яких додаткових елементів у рідину.

Аналіз показує, що стискальне зусилля в різних точках вздовж порожнини котушки відрізняється через різницю у напруженості магнітного поля в цих точках. Максимальне стискальне зусилля спостерігається в навколишній області точки максимальної напруженості магнітного поля. У точці максимальної напруженості саме стискальне зусилля дорівнює нулю, так як величина $\text{grad} = 0$. При подоланні максимуму напруженості стискальне зусилля змінює напрямок через зміну знака градієнта напруженості.

У момент активації електромагнітної котушки 3 (рис. 3.11), на запірний орган діють два види сил: тягове і радіальне, спрямоване до стінки гільзи. Під впливом цих сил запірний орган 1 починає перекочуватися вздовж стінки гільзи 2 і переміщується до нижнього зрізу внутрішнього магнітопровода 5, де стискальне зусилля дорівнює нулю. Однак через інерцію, він продовжує рухатися. В крайній верхній точці на запірний орган діють його вага, зворотне стискальне зусилля і швидкісний тиск середовища, яке рухається в зворотньому напрямку. Під впливом цих сил запірний орган рухається в зворотньому напрямку, проходить через точку максимальної напруженості магнітного поля і починає рухатися вгору. Внаслідок цього, при активації клапана запірний орган виконує амортизовані коливання в точці максимальної напруженості магнітного поля.

Оскільки запірний орган знаходиться біля стінки гільзи, на його полусфери діють різні сили, які генеруються швидкісним напором середовища. Це призводить до виконання запірним органом обертальних рухів. Крім того, обертальні рухи запірного органу спричиняються його контактом зі стінкою гільзи під час вертикальних коливань.

Для отримання лінійної характеристики таких систем можна провести розрахунки за допомогою відповідного інструменту або програмного забезпечення.

Пристрій (зображений на рис. 3.12) складається з основи зробленої з текстоліту, на якій розташований магнітний екран 2. У цьому магнітному екрані розташована циліндрична електромагнітна котушка 3, яка створює магнітне поле. Магнітний екран також виступає як магнітопровід для потоку магнітної котушки на зовнішній частині. У внутрішній порожнині котушки розміщена кювета 5 з матеріалом, що має властивості феромагнетика, і ця кювета розташована на горизонтальній площині рухомого штоку 6.

Шток взаємодіє з опорним винцем, який засувається в сталеву циліндричну пружину 7. Нижній кінець цієї пружини закріплений нерухомо. Нижня частина штока пов'язана з плунжером датчика переміщення, який фактично є стандартним лінійним диференціальним трансформатором (ЛДТ).

При подачі постійного струму на електромагнітну котушку в порожнині котушки створюється магнітне поле. Матеріал, що має властивості феромагнетика, притягується в цю порожнину та впливає на шток, змушуючи його переміщати плунжер (рис. 3.13).

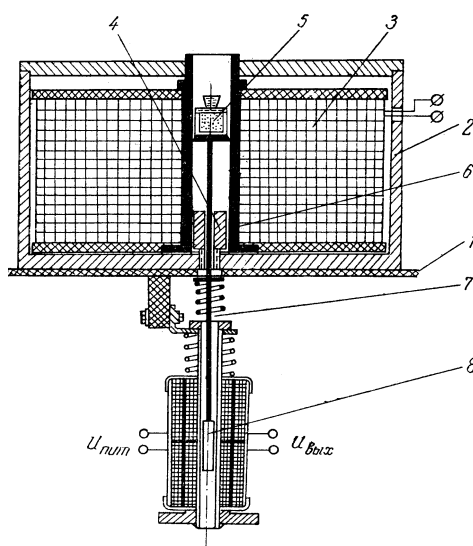


Рисунок 3.12 – Пристрій для визначення вмісту феромагнітного матеріалу

1 – текстолітова основа ; 2 – магнітний екран; 3 – електромагнітна котушка; 4 – феромагнітний сердечник; 5 – кювета; 6 – шток; 7 – циліндрична пружина; 8 – рухомий шток.

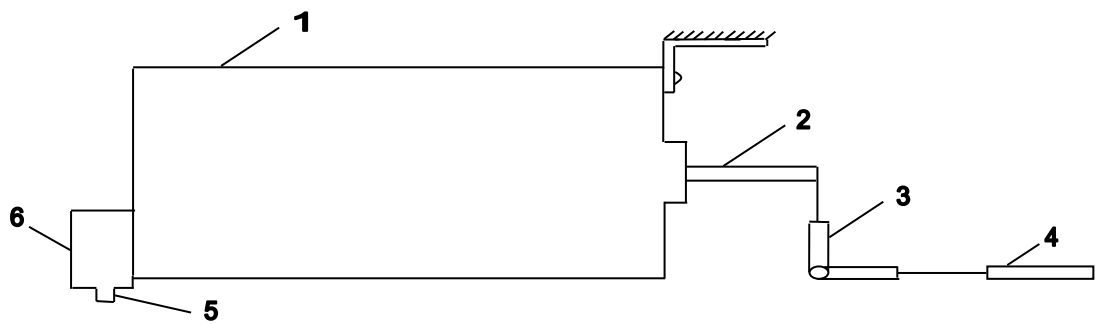


Рисунок 3.13 – Соленоїдний виконавчий механізм

1 – корпус; 2 – шток; 3 – серга; 4 – гідрозолотник; 5 – провід живлення; 6 – кожух.

В результаті проведених досліджень підтверджується, що залежність між кількістю феромагнітного матеріалу в осерді та переміщенням має лінійний характер, коли використовується пружина для компенсації зусиль. Ця властивість дозволяє реалізувати конструкцію виконавчого механізму для розроблюваної системи. У цій конструкції передбачено наявність електромагнітної котушки з магнітопроводом, який проявляє лінійний характер зміни напруженості магнітного поля вздовж своєї довжини і осі. Також у цій конструкції передбачена наявність феромагнітного осердя з постійною масою та циліндричної пружини. Цей компонент виявить лінійну взаємозв'язок між силою струму, що протікає через котушку, та величиною переміщення.

3.5 Обґрунтування виробу та опис конструкції САК швидкістю руху комбайна

Система автоматичного управління рухом комбайна в умовах зміни навантаження хлібною масою має структуру, яка включає чотири окремі блоки, що зв'язані між собою за допомогою електричних ліній зв'язку. Ці блоки включають в себе блок первинного та вторинного перетворювача, блок управління, блок задавача і блок виконавчого механізму.

Блок первинного та вторинного перетворювача складається з первинного перетворювача важільного типу, який щільно закріплений на важільному валу. На цьому валу знаходиться перемичка індуктивного перетворювача. Вал, який

містить перемичку, оточений кожухом, в якому знаходиться друга частина магнітопровода з вторинною електричною обмоткою. Кожух має герметичне виконання і в його бічних стінках встановлені сальники. Для захисту обмотки вторинного перетворювача від впливу вологи, вона пропитана боколітовим лаком. Кінці обмотки виведені на роз'єм, який розташований на корпусі. Корпус виготовлений з магніто-м'якої сталі, такої як СТ-3 або СТ-5, для забезпечення ефективного шунтування зовнішніх електромагнітних полів і захисту від їх впливу на вторинний перетворювач. Зовнішню і внутрішню поверхню корпуса покрито масляною фарбою. Корпус обладнаний кришкою, яка закріплена за допомогою чотирьох гвинтових з'єднань та резинової прокладки.

Блок первинного і вторинного перетворювачів підключається до блоку управління за допомогою двох жил проводів, обрані з металевим екраном, який також з'єднаний з корпусом.

Блок керування представляє собою виріб з магніто-м'якої сталі товщиною 2 мм і має кришку, яка закріплюється за допомогою чотирьох гвинтів. Цей корпус розміщується під пультом комбайнера і служить для захисту електричної схеми від зовнішніх електричних і магнітних полів. Він має чотири роз'єми, один із яких - чотириконтактний - призначений для подачі живлення від генератора і акумулятора комбайна. У цьому корпусі блока керування розміщені три плати: плата стабілізованих джерел живлення, плата вторинного перетворювача і плата керування. Один з роз'ємів на корпусі має три контакти і використовується для підключення задавача товщини шару хлібної маси, тоді як інші два роз'єми з двома контактами служать для зв'язку з вторинним перетворювачем і соленоїдом виконавчого механізму.

Блок задавача має форму змінного опору, який розташований на панелі між вмикачем плафона в кабіні і сигнальною лампочкою стояночних гальм. Під ручкою на цій панелі розташована шкала, що вказує значення завантаження комбайна хлібною масою. Блок виконавчого механізму представлений як окремий герметизований вузол, який встановлюється за допомогою умонтованого проводу, довжина якого визначається залежно від місця його установки.

4 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВИРОБУ

4.1 Визначення передаточної функції системи

Будемо використовувати відповідність між основними компонентами та динамічними елементами для створення структурної схеми системи.

Регульований об'єкт, а саме зернозбиральний комбайн за керуючим діянням з достатньою точністю для практики можна описати передаточною функцією виду:

$$W_{зк}(p) = \frac{K_{зк}}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} e^{-p\tau}, \quad (4.1)$$

де T_1 – стала часу; $K_{зк}$ – передаточний коефіцієнт комбайна; τ – час запізнювання; T_2 – стала часу.

Згідно з теорією та результатами експерименту, було встановлено, що характеристики зернозбирального комбайну змінюються залежно від швидкості руху, тому ми маємо використовувати середні значення цих характеристик для кожної передачі. Експериментально встановлено, що для першої швидкісної передачі $T_1=0,38$ с., $T_2^2=0,03$ с²; для другої передачі $T_1=0,75$ с., $T_2^2=0,12$ с² [8]. Отже, зернозбиральний комбайн є об'єктом регулювання із змінними параметрами. Його передаточна функція:

$$W_{зк}(p) = \frac{K_{зк}}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} e^{-p\tau}, \quad (4.2)$$

Регульований об'єкт має характеристичне рівняння :

$$T_2^2 p^2 + T_1 p + 1 = 0.$$

Корені дорівнюють

$$p_{1,2} = \frac{-T_1 \pm \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2 \cdot 1}}{2T_2^2};$$

де $T_1=0,38$ с; $T_2^2=0,03$ с².

Для першої передачі

$$P_{1,2} = \frac{-0,38c \pm \sqrt{0,1444c^2 - 4 \cdot 0,03c^2 \cdot 1}}{2 \cdot 0,03c^2} = \frac{-0,38c \pm 0,1562c}{0,06c^2}$$

$$P_1 = -3,73c^{-1}; P_2 = -8,9367c^{-1}.$$

Для другої:

$$P_{1,2} = \frac{-0,75c \pm \sqrt{0,5625c^2 - 4 \cdot 0,48c^2 \cdot 1}}{0,24c^2} = \frac{-0,75c \pm 0,2872c}{0,24c^2}$$

$$P_1 = -1,9283c^{-1}; P_2 = -4,3217c^{-1}.$$

У обох сценаріях було виявлено наявність від'ємних коренів, що свідчить про те, що регульований об'єкт є системою другого порядку без коливань. Проте, на першій передачі перехідний процес у системі буде припинятися значно швидше, ніж на другій передачі.

Відповідно до основної структури системи автоматичного регулювання, проведемо заміну елементів на динамічні компоненти.

Підсилювачі в операційних підсилювачах для порівняння, амплітуди та потужності будуть представлені як динамічні ланки. Ми позначимо їх результуючу передаткову функцію як наступний вираз:

$$W_{\Pi}(p) = K_{\Pi}. \quad (4.3)$$

Виконавчий механізм на основі соленоїда може бути представлений як динамічна ланка з коливальною характеристикою та відповідною передатковою функцією, яка має вигляд:

$$W_{BM}(p) = \frac{K_{BMM}}{T_{BM}^2 p^2 + 2\xi T_{BM} p + 1}. \quad (4.4)$$

Аналіз показує, що можна розглядати механічну складову соленоїдного виконавчого механізму як коливальну систему, включаючи масу, пружину та силу тертя. Для цього вихідні параметри складової ТВМ дорівнюють 0,04 секунди і ξ (коефіцієнт згасання) дорівнює 0,2. При таких значеннях параметрів виконавчий механізм може бути аперіодичною ланкою другого порядку. Крім того, до передаткової функції соленоїда повинна бути включена електрична складова, представлена електромагнітом. Передаткова функція цієї електричної частини має вигляд:

$$W_E(p) = \frac{K_E}{T_E p + 1}, \quad (4.5)$$

де $T_E = \frac{L_E}{R_E}$.

Стала часу T_E може бути $T_E = 0,1$ с.

Передаточна функція виконавчого механізму

$$W_{BM} = \frac{K_{BM}}{(T_{BM}^2 p^2 + 2\xi T_{BM} p + 1)(T_E p + 1)}, \quad (4.6)$$

де $K_{BM} = K_{BMM} \cdot K_E$.

Важливою складовою системи є важільний первинний перетворювач для вимірювання маси хлібної маси, який функціонує як підсилювальна динамічна ланка. Також до підсилювальних динамічних ланок входить індуктивний вторинний перетворювач, а також аперіодичні підсилювачі та випрямлений перетворювач. Давайте позначимо їх передаткові функції для подальшого аналізу:

$$W_D(p) = K_D. \quad (4.7)$$

Згладжувальний фільтр - аперіодична ланка з передаточною функцією.

$$W_{3\Phi}(p) = \frac{1}{T_{3\Phi} p + 1}, \quad (4.8)$$

де $K_{3\Phi} = 1$, а стала часу $T_{3\Phi} = R_{3\Phi} C_{3\Phi}$.

Інтегруючий аперіодичний підсилювач буде також аперіодичною динамічною ланкою, а передаточна функція матиме вигляд

$$W_I(p) = -\frac{K_I}{T_I p + 1}, \quad (4.9)$$

де T_I – стала часу інтегратора, що дорівнює $R_2 C$; K_I – коефіцієнт передачі інтегратора, що дорівнює $K_I = \frac{R_2}{R_1}$; R_2 – опір, встановлений в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача; R_1 – опір, встановлений на вході операційного підсилювача.

Стала часу інтегратора має значний порядок, і для її компенсації буде введено операційний підсилювач в прямий контур системи, до якого

підключений ланцюг зворотного зв'язку, що складається з послідовно з'єднаних ємності C і опору R_2 . Передаткова функція цього ланцюгу визначається наступним чином:

$$W_{КПІ}(p) = -\frac{T_{21}p + 1}{T_{11}p + 1}, \quad (4.10)$$

де $T_{21} = R_2C$; $T_{11} = R_1C$; k – передаточний коефіцієнт, що дорівнює одиниці.

Враховуючи, що в головному контурі САР передаточній функції динамічна ланка помножається одна на одну, знаменник $W_I(p)$, що дорівнює $(T_I p + 1)$, і чисельник $W_{КПІ}(p)$, що дорівнює $(T_{21} p + 1)$, скоротяться, так як $T_{21} = T_I$.

Структурна схема САР представлена на рис. 4.1.

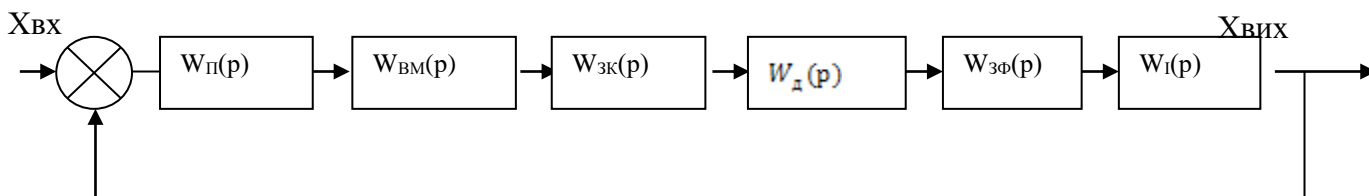


Рисунок 4.1 – Структурна схема САР регулювання швидкості руху комбайна без керуючого пристрою

Передаточна функція розімкненої системи

$$W_p(p) = \frac{K_{II} K_{BM} K_{ЗК} K_{Д} K_I}{(T_E p + 1)(T_{11} p + 1)(T_{BM}^2 p^2 + 2\xi T_{BM} p + 1)(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)(T_{3Ф} p + 1)} = \frac{K}{A(p)}, \quad (4.11)$$

де K – коефіцієнт підсилення розімкненої системи.

$$K = K_{II} K_{BM} K_{ЗФ} K_{Д} K_I. \quad (4.12)$$

Передаточна функція замкнутої системи має наступний вигляд:

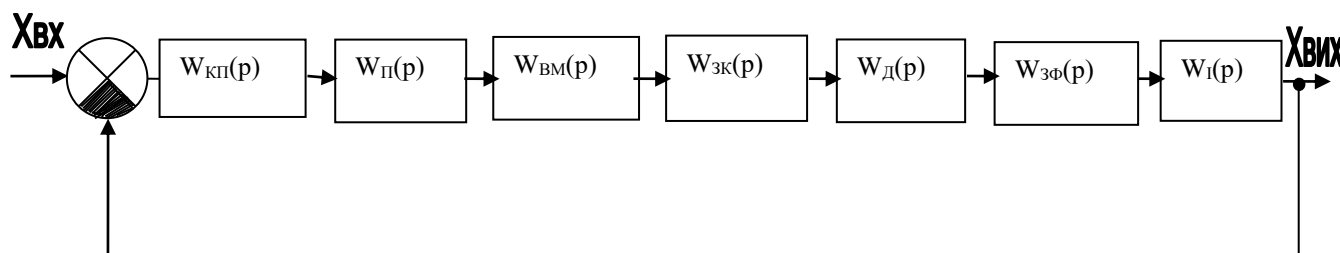


Рисунок 4.2 – Структурна схема САР регулювання товщини хлібної маси

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1+W_p(p)} = \frac{K}{A(p)\left[1+\frac{K}{A(p)}\right]} = \frac{K}{A(p)\left[\frac{A(p)+K}{A(p)}\right]} = \frac{K}{A(p)+K} = \frac{\overline{X_{BLX}}}{\overline{X_{BX}}}. \quad (4.13)$$

Визначимо $A(p)$, підставивши відповідні значення сталих часу:

$$A(p) = 0,000000002304p^7 + 0,0000006384p^6 + 0,0000423808p^5 + 0,001155912p^4 + 0,0265394p^3 + 0,28313p^2 + 1,071p + 1.$$

Враховуючи величину коефіцієнтів при старших похідних, спростимо рівняння, знехтувавши членами з p^7 , p^6 , p^5 та p^4 . При цьому характеристичне рівняння системи прийме наступний вид

$$A(p) + K = 0, \quad (4.14)$$

або

$$0,0265394p^3 + 0,28313p^2 + 1,071p + K + 1 = 0.$$

Поділимо рівняння на коефіцієнт при p^3 і будемо мати

$$p^3 + 10,6682894p^2 + 40,35509469p + 37,6798269 + 37,6798267K = 0.$$

Позначимо $a_3 = 37,67982697(1+K)$; $a_1 = 10,6682894$; $a_2 = 40,35509469$.

Визначимо

$$X = \frac{a_1}{\sqrt[3]{a_3}}; \quad Y = \frac{a_2}{\sqrt[3]{a_3^2}}, \quad (4.15)$$

$$X = \frac{10,6682894}{\sqrt[3]{37,67982697(1+K)}}; \quad Y = \frac{40,35509469}{\sqrt[3]{[37,67982697(1+K)]^2}}.$$

Відповідно завданню до САР перехідний процес повинен бути аперіодичним. Для цього значення параметрів Y і X повинні дати точку на діаграмі Вишнеградського. Умовою потрапляння в зону В на даній діаграмі може бути значення $y=6$. Знайдемо значення K для вказаної умови. Рівняння для Y дозволяє записати

$$6\sqrt[3]{[37,67982697(1+K)]} = 40,35509469.$$

Піднесемо ліву і праву частину до кубу і побачимо

$$216[1419,76936(1+2k+k^2)] = 65719,63$$

поділимо дане рівняння на 216 і 1419,77 і отримаємо

$$1+2K+K^2=0,2143$$

або

$$K^2+2K+0,78569932=0.$$

Знайдемо з даного рівняння K

$$K = \frac{-2 \pm \sqrt{4 - 4 \cdot 1 \cdot 0,78569932}}{2 \cdot 1} = \frac{-2 \pm 0,92585}{2};$$

$$K_1 = -0,537075; K_2 = -1,462925.$$

За вказаними умовами неможливо виконати реалізацію системи, яка розробляється, за заданими параметрами $Y=6$. Менші значення Y , наприклад, 4, обмежуються вузьким діапазоном. Для перевірки можливості створення монотонного перехідного процесу за наявності комплексно спряжених коренів у характеристичному рівнянні, діаграма Вишнеградського може бути використана. При $Y=3$, діапазон зміни X залишається в значному розмаїтті, і тому будемо перевіряти можливість виконання цих умов для заданих параметрів системи. Результати цієї перевірки можна виразити наступним чином:

$$27[1419,76936(1+2K+K^2)] = 65719,63$$

або

$$K^2+2K-0,71=0, \quad (4.16)$$

Знайдемо з рівняння K

$$K = \frac{-2 \pm \sqrt{4 + 4 \cdot 1 \cdot 0,71}}{2} = \frac{-2 \pm 2,615}{2};$$

Звідки

$$K_1 = \frac{0,615}{2} = +0,30766968;$$

K_2 буде мати число “менше” і не буде мати фізичного змісту.

Знайдемо параметр X при отриманому значенні коефіцієнта підсилення розімкненої системи

$$X = \frac{10,6682894}{\sqrt[3]{37,67982697 (1 + 0,30766968)}} = \frac{10,6682894}{3,67} = 2,90689 \approx 2,91$$

Коли $X=2,91$, система все ще перебуває в зоні монотонного перехідного процесу, і область аперіодичного перехідного процесу, відповідно до діаграми Вишнеградського, починається з точки ($X=3; Y=3$).

Розглянемо систему при іншій швидкості руху. Вона буде мати рівняння

$$0,0118533p^3+0,15086p^2+0,701p+1+K=0.$$

Поділивши на коефіцієнт при p^3 , матимемо

$$p^3+12,72722574p^2+59,139649p+84,36469(1+K)=0.$$

Позначимо

$$a_1=12,72722574$$

$$a_2=59,139649$$

$$a_3=84,36469(1+K).$$

Визначимо Y при $K=0,30766968$.

$$Y = \frac{59,139649}{\sqrt[3]{7117,4 \cdot 1,71}} = \frac{59,139649}{23} = 2,57129.$$

При знайденому значенні Y система знаходиться в зонні перехідного процесу, який є монотонним.

Перевіримо значення X

$$X = \frac{12,7272574}{\sqrt[3]{84,36469(1+0,3077)}} = \frac{12,7272574}{4,8} = 2,6515.$$

При цьому значенні X САР знаходиться в зоні монотонного перехідного процесу.

Отже, на всіх режимах роботи агрегату при $K=0,3077$ система буде мати монотонний перехідний процес, що відповідає вимогам.

Передаточна функція розімкненої системи має вид:

$$W_p(p) = \frac{K}{A(p)} \quad (4.17).$$

$$W_p(p) = \frac{0,3077}{0,0265394 p^3 + 0,28313 p^2 + 1,071 p + 1}$$

Підставимо замість оператора Лапласа p уявний оператор $j\omega$

$$W_p(j\omega) = \frac{0,3077}{-j \cdot 0,265394 \omega^3 - 0,28313 \omega^2 + j \cdot 1,071 \omega + 1}.$$

Позначимо чисельник і знаменник залежності на спряжений до знаменника вираз.

Знаменник.

$$\begin{aligned}
& (-j0,0265394\omega^3 - 0,28313\omega^2 + j1,071\omega + 1) \cdot (j0,0265394\omega^3 - 0,28313\omega^2 - \\
& j1,071\omega + 1) = 0,0007\omega^6 - j0,0265 \cdot 928313\omega^5 - 0,0284\omega^4 + j0,0265394\omega^3 + \\
& j0,0265394 \cdot 0,28313\omega^5 + 0,08\omega^4 - j1,071 \cdot 0,28313\omega^3 - 0,28313\omega^2 - 0,0284237\omega^4 + \\
& j0,28313 \cdot 1,071\omega^3 + 1,147\omega^2 - j1,071\omega - j0,0265394\omega^3 - 0,28313\omega^3 + j1,071\omega + 1 \\
& = 0,0007\omega^6 + 0,0231526\omega^4 + 0,58074\omega^2 + 1.
\end{aligned}$$

Чисельник.

$$j0,008166\omega^3 - 0,087119\omega^2 - j0,3295467\omega + 0,3077;$$

$$W_p(j\omega) = \frac{0,3077 - 0,087119\omega^2}{0,0007\omega^6 + 0,0231526\omega^4 + 0,58074\omega^2 + 1} + j \frac{0,008166\omega^3 - 0,3295467\omega}{0,0007\omega^6 + 0,0231526\omega^4 + 0,58074\omega^2 + 1}.$$

Умова, коли $Q(p)=0$;

Це буде тоді, як чисельник прийме значення 0, тобто

$$0,008166\omega^3 - 0,3295467\omega = 0;$$

Коли $\omega=0$

$$\omega(0,008166\omega^2 - 0,3295467) = 0;$$

Коли

$$0,008166\omega^2 = 0,3295467.$$

$$\omega^2 = \frac{0,3295467}{0,008166} = 40,3559515.$$

$$\omega^1 = \pm\sqrt{40,3559515} = \pm 6,3526334308$$

$$\omega^1 = +6,3526334308.$$

Визначимо $P(\omega)$ при даній частоті;

$$P(\omega) = \frac{0,3077 - 0,087119 \cdot 40,3559515}{46,0068 + 37,7065 + 23,4363 + 1} = -\frac{3,208}{108,1496} = -0,0296626.$$

0,0296626 – це точка перетину від'ємної осі $[P(\omega)]$, запас великий до -1 .

4.2 Робота системи на першій і на другій іншій передачі

$$W_{p_2}(p) = \frac{0,3077}{0,0118533p^3 + 0,15086p^2 + 0,701p + 1}$$

Підставимо замість p уявний оператор $j\omega$.

$$W_{P_2}(p) = \frac{0,3077}{-j0,0118533 \omega^3 - 0,15086 \omega^2 + j0,701 \omega + 1}$$

Перемножимо і чисельник і знаменник залежності на спряжений знаменнику вираз і відділимо дійсну і уявну частини

$$(-j0,0118533 \omega^3 - 0,15086 \omega^2 + j0,701 \omega + 1)(j0,0118533 \omega^3 - 0,15086 \omega^2 - j0,701 \omega + 1) = + 0,0001405 \omega^6 - 0,008309 \omega^4 + j0,0118533 \omega^3 + j0,0118533 \cdot 0,15086 \omega^5 + 0,02275874 \omega^4 - j0,701 \cdot 0,15086 \omega^3 - 0,150086 \omega^2 - 0,0083092 \omega^4 + j0,15086 \cdot 0,701 \omega^3 + 0,4914 \omega^2 - j0,701 \omega - j0,0118533 \omega^3 - 0,15086 \omega^2 + j0,701 \omega + 1 = 0,0001405 \omega^6 + 0,00614 \omega^4 + 0,18968 \omega^2 + 1;$$

Знаменник

$$0,0001405 \omega^6 + 0,00614 \omega^4 + 0,18968 \omega^2 + 1;$$

Чисельник

$$j0,00364726 \omega^3 - 0,0464196 \omega^2 - j0,2157 \omega + 0,3077.$$

$$W_{P_2}(p) = \frac{0,3077 - 0,0464196 \omega^2}{0,0001405 \omega^6 + 0,00614 \omega^4 + 0,18968 \omega^2 + 1} + j \frac{0,00364726 \omega^3 - 0,2157 \omega}{0,0001405 \omega^6 + 0,00614 \omega^4 + 0,18968 \omega^2 + 1};$$

Знайдемо умови, коли умовна частина перетворюється в нуль. Для цього

$$\omega(0,00364726 \omega^2 - 0,2157) = 0; \quad \omega = 0.$$

$$0,00364726 \omega^2 = 0,2157.$$

$$\omega^2 = \frac{0,2157}{0,00364726} = 59,140286.$$

$$\omega = \pm \sqrt{59,140286} = \pm 7,690272.$$

$$\omega = +7,69.$$

Знайдемо значення $P(\omega)$ при даній частоті.

$$P(\omega) = \frac{0,3077 - 0,0464196 \cdot 59,14}{29,06 + 21,4749 + 11,217675 + 1} = \frac{-2,437555}{62,752575} = -0,038844.$$

$$-0,038844 \ll 1.$$

Отримана САР має низьку чутливість, тому її слід удосконалити. Сталі часу в системі автоматичного регулювання $T_{зф}=0,2$ с.; $T_{11}=0,005$ с.; $T_{ВМ}=0,04$ с.; $T_{ВМ1}=2\xi$; $T_{ВМ}=0,016$ с.; $T_E=0,1$ с.; менша стала часу агрегата малі і їх можна об'єднати, замінивши всі ці ланки однією інерційною динамічною ланкою. Отже, для першої передачі менша стала часу агрегата $T_K=0,173$ с., сума даного

часу буде $T_{\Sigma}=T_1=0,534$ с. Для другої швидкісної передачі менша стала часу комбайна $T_K=0,346$ с., сума сталих часу буде дорівнювати $T_{\Sigma}=T_1=0,707$ с. З врахуванням сказаного динамічні ланки матимуть передаточні функції :

Для першої швидкісної передачі

$$W_{11}(p) = \frac{K_1}{0,534 p + 1}, \quad (4.18)$$

для другої швидкісної передачі

$$W_{12}(p) = \frac{K_1}{0,707 p + 1}, \quad (4.19)$$

Як окрему динамічну ланку розглянемо інерційну ланку, що є частиною комбайна, яка вміщує сталу часу з значенням достатньо великим. Передаточна функція першої швидкісної передачі буде дорівнювати

$$W_{21}(p) = \frac{K_2}{0,38 p + 1}, \quad (4.20)$$

для другої швидкісної передачі

$$W_{22}(p) = \frac{K_2}{0,75 p + 1}, \quad (4.21)$$

Введемо ідеальну інтегруючу ланку у якої велика стала часу $T_3=10$ с. Її передаточна функція має вид

$$W_3(p) = \frac{1}{T_3 p} = \frac{1}{10 p},$$

Передаточна функція розімкненої системи має вид

$$W_p(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)T_3 p} = \frac{K}{A(p)}, \quad (4.22)$$

$$A(p) = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 p^3 + T_3(T_1 \cdot T_2)p^2 + T_3 p, \quad (4.23)$$

Передаточна функція замкненої системи має вид

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{K}{A(p) + K}, \quad (4.24)$$

Характеристичне рівняння має вид

$$T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 p^3 + T_3(T_1 + T_2)p^2 + T_3 p + K = 0, \quad (4.25)$$

З врахуванням знаків сталих часу характеристичне рівняння для першої швидкісної передачі

$$2,029p^3 + 9,14p^2 + 10p + K = 0.$$

Для другої швидкісної передачі

$$2,446p^3 + 10,53p^2 + 10p + K = 0.$$

Розглянемо САР і комбайн на другій передачі. Поділимо характеристичне рівняння на коефіцієнт p^3 і тоді отримаємо вираз

$$p^3 + 4,305p^2 + 4,088 + 0,409 K = 0.$$

Позначимо $a_1=4,305$; $a_2=4,09$; $a_3=0,409$ $K=0$.

Ми визначимо коефіцієнт підсилення розімкнутої системи K при умові аперіодичного перехідного процесу, задавшись значенням $X=5,5$ з діаграми Вишнеградського.

$$X = \frac{a_1}{\sqrt[3]{a_3}} = \frac{4,305}{\sqrt[3]{0,409 \cdot K}};$$

Звідки матимемо

$$a_1^3 = X^3 a_3 = X^3 \cdot 0,409 K.$$

Визначимо координату Y ;

$$Y = \frac{a_2}{\sqrt[3]{a_3^2}} = \frac{4,09}{\sqrt[3]{0,48^2}} = 6,7.$$

Згідно з діаграмою Вишнеградського, отримані значення X і Y вказують на те, що в системі спостерігається аперіодичний перехідний процес.

При роботі комбайна на першій передачі та за вказаних параметрах, характеристичне рівняння для системи прийме наступний вид:

$$P^3 + 4,5p^2 + 4,9285p + 0,5786=0.$$

$$A_1=4,5; a_2=4,9285; a_3=0,5786$$

$$X = \frac{4,5}{\sqrt[3]{0,5786}} = 5,42 ,$$

$$Y = \frac{4,9285}{\sqrt[3]{0,3348}} = 7,143.$$

За отриманих значень X і Y система і далі залишається в області аперіодичного перехідного процесу. Тепер розглянемо запаси стійкості цієї розімкненої системи. Передаточна функція розімкненої системи була обчислена раніше і має такий вигляд:

$$W_p(p) = \frac{K}{T_1 T_2 T_3 p^3 + T_3 (T_1 + T_2) p + T_3 p}, \quad (4.26)$$

Для першої передачі

$$W_{p1}(p) = \frac{1,174}{2,029 p^3 + 9,14 p^2 + 10}.$$

Для другої передачі

$$W_{p2}(p) = \frac{1,174}{2,446 p^3 + 10,53 p^2 + 10 p}.$$

Давайте розглянемо функцію передачі системи автоматичного регулювання, коли комбайн працює на першій передачі. Для цього замість оператора p в функції передачі $W(p)$ підставимо уявний оператор $j\omega$, і ми отримаємо амплітудно-частотну характеристику (ФАЧХ) $j\omega$ і отримаємо АФЧХ (рис. 4.3)

$$W_{p1}(j\omega) = \frac{1,174}{-j2,029\omega^3 - 9,14\omega^2 + j10\omega}.$$

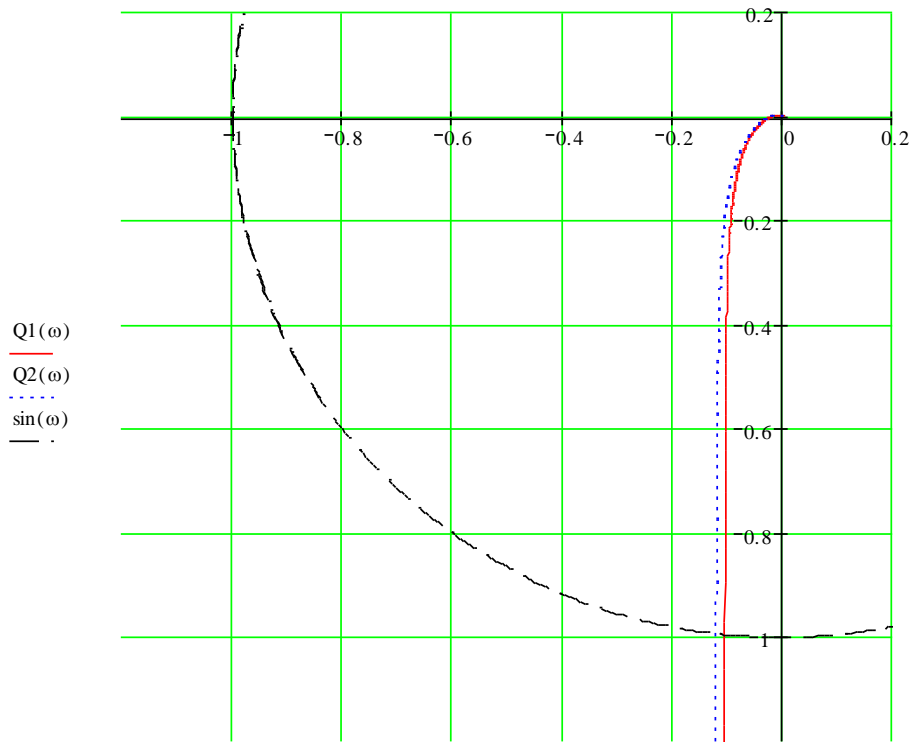
Коли комбайн працює на другій швидкісній передачі отримаємо АФЧХ (рис. 4.3)

$$W_{p2}(j\omega) = \frac{1,174}{-j2,446\omega^3 - 10,53\omega^2 + j10\omega}.$$

Потім ми проведемо аналіз стійкості системи та визначимо запаси стійкості, використовуючи частотний метод Найквіста-Михайлова.

Згідно з цим критерієм, стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання визначається за амплітудно-фазовою частотною характеристикою стійкої розімкнутої системи. Розімкнута система автоматичного регулювання вважається стійкою, якщо вона складається лише зі стійких динамічних ланок (максимум одна інтегруюча ланка). Щоб замкнута система була стійкою, необхідно та достатньо, щоб амплітудно-фазова частотна характеристика розімкнутої системи не містила точку з координатами $(-1, j0)$ у діапазоні частот від 0 до безкінечності. Важливо відзначити, що для обчислення запасів по модулю та фазі використовувався математичний редактор MatCad.

Маємо: система за критерієм Найквіста-Михайлова стійка і запас стійкості за модулем $Z_m = 0,97$; за фазою $-Z_\phi = 83,8^\circ$.



$P1(\omega), P2(\omega), \cos(\omega)$

Рисунок 4.3 – АФЧХ системи при роботі комбайна на першій та на другій передачі

Зараз ми розглянемо області стійкості за допомогою методу D-розбиття в площині одного параметра. Вище згаданий критерій допомагає визначити, чи система автоматичного регулювання стійка при певних параметрах її елементів. Проте цей критерій не надає відповіді на питання про те, які саме параметри системи можуть змінюватися, залишаючи систему стійкою або допомагаючи досягти стійкості. Для знаходження границь або ділянок зміни одного або кількох параметрів системи при збереженні або досягненні стійкості використовується метод D-розбиття.

Ми створимо область стійкості системи в площині параметра K , так як цей параметр може змінюватися. Для цього ми виразимо характеристичне рівняння відносно K , і після підстановки та виділення дійсної та уявної частини цього виразу ми отримаємо криву D-розбиття в площині параметра K при зміні частоти від мінус нескінченності до плюс нескінченності.

З області стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта K для першої та другої швидкості, в даному випадку $K_{1кр} = 45$, $K_{2кр} = 43$. Оскільки у

стійкій системі всі корені знаходяться ліворуч від уявної вісі, при обході її від $-\infty$ до $+\infty$ ділянка стійкості також буде розташована ліворуч від отриманої кривої. Для полегшення пошуку ділянки стійкості її можна позначити штриховкою на лівій стороні при русі від $-\infty$ до $+\infty$. Як видно, вказане значення коефіцієнта підсилення системи $K = 1,174$ потрапляє в область стійкості

Інформація про перехідні процеси для вихідної та змодифікованої системи на першій та другій передачі надана в додатках. Ці графіки дозволяють здійснити оцінку прямих показників якості.

Показники якості вихідної системи для першої та другої швидкості:

- перерегулювання $\delta_1 = 21,2 \%$, $\delta_2 = 27,2 \%$;
- період коливань $T_1 = 2,5$, $T_2 = 2,3$;
- перехідні процеси для обох швидкостей коливальні;
- час досягнення першого максимуму $t_{1\max} = 1,8$ с, $t_{2\max} = 1,0$ с;
- час наростання перехідного процесу $t_{1н} = 1,3$ с, $t_{2н} = 0,6$ с;
- декремент затухання перехідного процесу $d_1 = 1,56$, $d_2 = 1,35$;
- запас стійкості по фазі $z_\phi \approx 83,8^\circ$;
- запас стійкості по модулю $z_M \approx 0,97$;

- час регулювання $t_{1р} \approx 6,9$ с, $t_{2р} \approx 7,8$ с;
- кількість коливань перехідного процесу $n_1 = 2$, $n_2 = 2$.

На основі синтезу корекційного пристрою системи автоматичного регулювання (САР), були отримані такі характеристики для першої та другої передачі:

- час регулювання $t_{1р} \approx 0,8$ с, $t_{2р} \approx 0,9$ с;
- перехідні процеси монотонні;
- перерегулювання $\delta_1 = 0 \%$, $\delta_2 = 0 \%$.

Отже, можна прийти до висновку, що створена система відповідає усім необхідним вимогам, які ставляться до подібних систем.

5 РОБОТИ, ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ САК РУХОМ КОМБАЙНА В УМОВАХ ЗМІНИ ЗАВАНТАЖЕННЯ ХЛІБНОЮ МАСОЮ

Система побудована за модульним (блочним) принципом, що забезпечує зручність у діагностиці та обслуговуванні. Перевірка працездатності кожного окремого модуля виконується відповідно до вимог, які ставляться до кваліфікованого технічного персоналу, що здійснює обслуговування електротехнічної частини зернозбирального комбайна. Спеціалісти мають змогу здійснювати повний цикл робіт: від встановлення та налагодження до експлуатації системи в польових умовах.

Монтаж системи починається з встановлення блоку первинного та вторинного перетворювача, який монтується без потреби в спеціальних інструментах або складних операціях. Блок управління встановлюється під приладовою панеллю оператора комбайна та фіксується за допомогою двох стандартних гвинтів.

Підключення блоку управління до перетворювачів здійснюється через спеціальний кабель, оснащений роз'ємами на обох кінцях. Провід прокладається вздовж конструкційних елементів комбайна, має відповідну довжину для забезпечення надійного з'єднання і механічної стійкості. Для підключення живлення блок управління з'єднується з акумулятором комбайна, а також із вихідними клемами системи за допомогою двох кабелів із чотирма роз'ємами.

Крім того, для взаємодії з блоком задавача передбачено трижильний кабель із триконтактним роз'ємом, який забезпечує надійний сигналовий зв'язок між елементами системи. Така конструктивна організація забезпечує простоту монтажу, високу надійність з'єднань і ефективну роботу системи в умовах експлуатаційних навантажень.

Поруч із гідравлічним підсилювачем розташований соленоїдний виконавчий механізм, який відповідає за регулювання швидкості руху комбайна. Цей механізм взаємодіє з важільним перетворювачем, що має плунжер золотника гідравлічного підсилювача, забезпечуючи точне управління

гідравлічною системою. Для передачі керуючих сигналів між виконавчим механізмом і блоком управління використовуються два жилкові дроти, оснащені двома контактними роз'ємами. Таке підключення гарантує надійний електричний контакт та ефективну координацію роботи системи керування швидкістю.

При запуску комбайна система автоматичного керування майже повністю готова до роботи, і для її оптимального функціонування необхідно провести лише налаштування вторинного перетворювача, який відповідає за точний контроль товщини шару хлібної маси. Цей етап налаштування є критично важливим для забезпечення коректної роботи системи і подальшої стабільності процесу збору урожаю.

Для початку регулювання потрібно відкрити захисну кришку кожуха, що закриває блок вторинного перетворювача, щоб отримати доступ до його механізмів. Далі слід послабити кріплення на валу первинного перетворювача, що дозволяє здійснювати його вільне регулювання. Вал необхідно встановити у положення, яке відповідає нульовій позначці товщини шару хлібної маси — це забезпечує правильну базову установку системи.

Після цього плавно, без ривків, обертаючи вал, слід встановити перемичку магнітопровода на заздалегідь задану контрольну відмітку, яка визначається технічними вимогами або попередніми налаштуваннями. Цей крок є важливим для точного калібрування системи і забезпечення коректного зчитування показників товщини шару. Коли первинний перетворювач займе необхідне положення, він фіксується в нерухомому стані за допомогою кріплень, що виключає зміщення під час експлуатації. Завершальним етапом налаштування є закриття захисного кожуха, що забезпечує захист механізмів від пилу, вологи та інших зовнішніх факторів, які можуть вплинути на роботу системи.

Обслуговування даної системи здійснюється спільно з іншими електронними та механічними системами комбайна, що значно спрощує технічну підтримку і дозволяє використовувати для цього кваліфікований персонал, який вже знайомий із конструкцією та принципами роботи агрегату. Такий підхід гарантує зручність, швидкість та ефективність експлуатації, а також зменшує час простою і підвищує надійність роботи комбайна в польових умовах.

ВИСНОВКИ

У даній випускній кваліфікаційній роботі була створена система автоматичного керування швидкістю руху зернозбирального комбайна.

Метою даної роботи було усунення динамічних перевантажень, що виникали в важливих частинах машини, і забезпечення якісного збирання та обробки хлібної маси в комбайні. Крім того, впровадження такої системи має на меті створення сприятливих умов для роботи комбайнера, який зможе зосередитися на контролі ефективності роботи вузлів, а не на їхньому налаштуванні.

Для досягнення цілей було внесено зміни в систему керування процесом завантаження хлібної маси в комбайн, при цьому мінімізуючи конструктивні зміни. Також була розроблена електрогідравлічна схема, в якій гідравлічна частина лишалася незмінною і відповідала характеристикам існуючого комбайна "Нива", а внесені зміни стосувалися лише первинного перетворювача хлібної маси.

Розроблений вторинний перетворювач датчика товщини хлібної маси включає в себе індуктивний перетворювач та інтегратор, призначений для усереднення пульсуючого сигналу за струмом потоку.

Розроблений соленоїдний виконавчий механізм співпрацює з плунжером гідрозолотника підсилювача комбайна.

Система автоматичного керування швидкістю руху забезпечує стійкість та необхідну якість в умовах зміни параметрів різних ланок під час роботи комбайна. Ця система уникає коливань і перевантажень механізмів, і забезпечує необхідні запаси стійкості, навіть у найскладніших умовах роботи.

З конструктивної точки зору, ця схема включає чотири блоки: перший блок, який включає первинний та вторинний перетворювачі; другий блок, що містить соленоїдний виконавчий механізм; третій блок управління; та блок задавача. З метою забезпечення безпеки праці було розраховано систему захисного заземлення для обслуговування комбайна та відповідних систем під час експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рослинництво: Підручник /О. І. Зінченко, В. Н. Салатенко, В. М. Білоножко; За ред. О. І. Зінченка. – К.: Аграрна освіта, 2001. – 591 с.: іл.
2. Автоматика и автоматизация мобильных сельскохозяйственных машин. Носов Г. Р., Кондратец В. А., Сакало Л. Г., Серода Л. И. – К.: Вища школа. Главное издательство, 1984. – с. 248.
3. Довідник комбайнера / Ю. М. Коваль, В. В. Бугрим. – К.: Урожай, 1989. – 240 с.
4. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – К.: Либідь, 1997. – 544 с
5. Конструирование и технология производства сельскохозяйственных машин. Республиканский межведомственный научно тех. сборник. Выпуск 15 Киев «Техника» 1985.
6. В. О. Кондратец. Теорія і технічні засоби систем : Підручник. – К.: Вища шк., 1993. – 319 с.: іл. – /Автоматика та автоматизація виробництва с. – г. машин: У24.; Ч. І.
7. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования. - Киев: “Наукова думка”, 1981. – 940 с.
8. Расчёт измерительных и усилительных элементов автоматических систем (справочное пособие) Н. М. Чумаков, А. Э. Асланян, М. Г. Вайнер, В. И. Панов, Н. С. Сивов, О. К. Спасокукоцкий, А. И. Суд-Злочевский, В. П. Теплов, И. И. Чугунов. «Техника», 1971, 356 стр.
9. Конструирование и технология производства сельскохозяйственных машин. Республиканский межведомственный сборник, вып. 7. Киев «Техника» 1977 г., 75 с.
10. Танатор А. И. Элементы промышленной автоматике и их динамические свойства. – К.: Техніка, 1975. – 232 с.