

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка та дослідження автоматизованої системи об'ємного дозування
гранульованих комбікормів

Виконав: студент

VI курсу, групи КАмз-61

спеціальності

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Періг Т.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Капаціла Ю.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Шовкун О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Савків В.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Станько А.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Савків В.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« » 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Періг Тарас Богданович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження автоматизованої системи об'ємного дозування гранульованих комбікормів

Керівник роботи Капаціла Юрій Богданович, канд. техн. наук, доцент кафедри АВ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «11» жовтня 2024 року № 4/7-1077

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 грудня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні вимоги щодо кількості та технічних умов для дозування комбікормів

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Аналітична частина

Технологічна частина

Конструкторська частина

Науково-дослідна частина

Спеціальна частина

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Титульний слайд

Актуальність роботи

Завдання роботи

Основна частина

Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина			
Охорона праці та			
безпека в надзв. ситуаціях			

7. Дата видачі завдання 15 жовтня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Періг Т.Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Капаціла Ю.Б.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини дипломної роботи становить _____.

Об'єм пояснювальної записки складає ____ друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано ____ літературних джерел.

Розроблено нову схему контролера дозування сировини при виробництві пелет; зокрема, у виробництві кормів з тестуванням і впровадженням на заводі. Запропонований контролер спрямований на вирішення низки проблем, які переважають у різних конфігураціях дозування на підприємствах. Нова схема контролера прагне бути легшою для конфігурації та більшою стійкістю до зовнішніх перешкод, що має привести до системи керування дозуванням із підвищеною точністю, меншою кількістю тривог і меншим часом, витраченим на налаштування системи.

За допомогою ітераційного процесу розробляється остаточний контролер дозування. Пропорційний зворотний зв'язок контролера перевірено, що дало уявлення про динаміку процесу з безперервними керуючими входами. Потім було перевірено контролер зворотного зв'язку з кількома станами, де вага регулюється на основі пропорційного регулятора, а швидкість потоку сировини контролюється інтегрованим контролером зворотного зв'язку. Щоб керування потоком було надійним, використовується фільтр для послаблення зовнішніх завад. Нелінійні зважені функції похибок також використовуються для отримання більш бажаної динаміки контролера.

Ключові слова: КОНТРОЛЕР, ПЕЛЕТА, ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК, КЕРУВАННЯ, ФІЛЬТР.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	7
1.1. Контроль параметрів якості комбікормів протягом виробництва.....	7
2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	19
2.1. Опис процесу.....	19
2.2. Огляд дозування.....	21
2.2.1. Поточний стан контролю	22
2.3. Аналіз дозування.....	23
2.4. Аналіз завдань розробки	31
3 КОСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	33
3.1. Контролер пропорційного зворотного зв'язку.....	33
3.1.1. Евристика та міркування для пропорційного контролера.....	34
3.2. Фільтрування	40
3.3. Контролер зворотного зв'язку з кількома станами	44
3.4. Функції нелінійного посилення для контролера з кількома станами.	46
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	53
4.1 Результати аналізу даних.....	53
4.2. Р-контролер.....	55
4.3. Оцінка моделі.....	57
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	70
5.1. Налаштування контролера на основі індексу продуктивності	70

<i>4.5. Повністю зібрана схема управління</i>	<i>74</i>
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ...	80
<i>6.1 Вимоги охорони праці під час роботи з електроустаткуванням.....</i>	<i>80</i>
<i>6.2 Вимоги безпеки під час виконання робіт</i>	<i>85</i>
<i>6.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування</i>	<i>87</i>
<i>6.4 Розрахунок захисного заземлення</i>	<i>89</i>
ВИСНОВКИ.....	95
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	96

ВСТУП

Крім місцевих кормових ресурсів, комбікорми для великої рогатої худоби та стратегічні кормові добавки є важливим джерелом поживних речовин для тварин, які ростуть і лактують [11, 12, 13]. Щоб гарантувати, що ці корми та кормові добавки виробляються економічно ефективним способом і відповідно до стандартних специфікацій, необхідно брати до уваги різні аспекти, пов'язані з найменшою вартістю складу корму, перевіркою якості сировини, зберіганням, виробництвом тощо.

Ступінь якості — це консистенція, у якій корми розроблені, оброблені, змішані та доставлені, порівняно з очікуваними. Тварини краще реагують, якщо в кормах мало поживних речовин; і схожий за вмістом вологи, текстурою та рівнем доступності поживних речовин. Зв'язок між якістю корму та продуктивністю тварин є важливим, тому завдання для дієтологів та інших, хто бере участь у виробництві кормів для великої рогатої худоби, полягає в постійному моніторингу всіх аспектів системи виробництва кормів, що використовується, і вимірюванні тих змінних, які є хорошими показниками контролю якості. Для комбікормової промисловості контроль якості є обов'язком керівництва та включає кваліфікований персонал, який проходить навчання для забезпечення високого рівня організації, документування та контролю за різними процедурами та процесами, необхідними для гарантування основної якості кормових інгредієнтів і кормів [14, 15, 16]. З метою забезпечення тварин необхідними поживними речовинами для задоволення їх потреб у утриманні, зростанні, вагітності та виробництві молока, щоб зменшити ризики для здоров'я тварин і звести до мінімуму виділення і викиди в навколишнє середовище, хімічний склад корму великої рогатої худоби, який використовується в раціоні повинен бути точно відомий.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Контроль параметрів якості комбікормів протягом виробництва

Контроль якості у виробництві кормів є надзвичайно важливим для загального успіху та прибутковості молочного підприємства. Немає іншого фактора, прямо чи опосередковано пов'язаного з правильним харчуванням і високою продуктивністю тварин, який є більш критичним, ніж контроль якості корму та узгодженість раціону [17, 18, 19, 20]. Ступінь якості - це консистенція, в якій корми сформовані, оброблені (рис. 1.1), змішані та доставлені в порівнянні до того, що очікується.



Рисунок 1.1 Контроль роботи установки

Тварини краще реагують на корм коли він має низьку варіацію поживних речовин, які їм пропонують і подібний за вмістом вологи, текстурою та рівнем доступності енергії.

Зв'язок між якістю корму та продуктивністю тварин є важливим і охоплює не тільки кількісну кількість усіх компонентів корму, а й перетравність і метаболізм цих компонентів. Таким чином, завдання для

дієтологів та інших, хто бере участь у виробництві кормів для тварин, полягає в постійному моніторингу всіх аспектів системи виробництва кормів, що використовується, і вимірюванні тих змінних, які є хорошими показниками контролю якості [21, 22, 23]. Для комбікормової промисловості система контролю якості є обов'язком керівництва та передбачає належну підготовку персоналу для забезпечення високого рівня організації, документування та контролю різноманітних процедур і процесів, необхідних для гарантування основної якості кормів і кормів.

Діяльність з виробництва комбікормів для великої рогатої худоби включає транспортування інгредієнтів до виробничого блоку зі сховища сировини, очищення та відокремлення інгредієнтів, змішування всіх інгредієнтів у необхідних пропорціях, подрібнення їх до порошкоподібної форми, де це необхідно, і виготовлення готового корму у формі пюре або гранул, зважування та пакування у відповідні пакети. Всі ці функції виконуються в гігієнічних умовах сучасним обладнанням [24, 25, 26, 27].

Сфера діяльності та пильності щодо контролю якості з боку спеціаліста з годівлі тварин не обмежується лише лабораторією. Йому слід часто обходити завод і склади, щоб перевірити стратегічні точки. Навіть незначна недбалість у цих моментах може негативно вплинути на якість і вартість виробу. Однак обхід і перевірка всіх важливих моментів має відбуватися лише в дусі контролю якості. Спеціаліст з годівлі тварин може протистояти перевірці в таких пунктах:

1. Оптова операція прийому.
2. Прийом сировини у відвантажувальний бункер залежно від часу старіння (система FIFO).
3. Операція приготування партії.
4. Операція шліфування.
5. Операція змішування – Сухе.
6. Операція змішування патоки.

7. Робота пелетного млина.
8. Операція охолодження пелет.
9. Операція контролю вологи.
10. Розфасовка в мішки.
11. Біновий вибірка.
12. Операція попереднього змішування.
13. Розділ аспірації.
14. Оптова операція прийому.

Спеціаліст з годівлі тварин повинен перевірити вхідні кормові інгредієнти на їх колір, консистенцію, запах, сторонні речовини, вологі плями, ріст цвілі тощо, щоб мати уявлення про якість сировини з перших вуст. Необхідно звернути увагу на те, щоб зразки збиралися систематично пробовідбірником і під його безпосереднім наглядом [28, 29]. Ідентифікація сировини за допомогою систем штрих-кодів ідеально вписується в належним чином організовану систему контролю якості. Офіцер контролю якості також повинен проінструктувати керівника щодо правильного укладання мішків у складі сировини.

Прийом сировини у відвальний бункер

Для надійного прийому матеріалів достатньо ефективних і вільних від пилу пунктів прийому скидання з великою пропускною здатністю. Сировина скидається за встановленим графіком у різні відсипні бункери, передбачені в складі сировини. Щільність матеріалу значною мірою визначає кількість і швидкість конвеєра. Відпущена у виробництво сировина підлягає перевірці на її придатність до віддачі у виробництво. Матеріали, пошкоджені під час зберігання (через високу вологість, пліснявіння, шкідників, гризунів або прогірклість), необхідно відсортувати та викинути [30, 31, 32]. Систему пиловіддалення, встановлену на кожній точці звалища, необхідно регулярно перевіряти та періодично обслуговувати, щоб переконатися, що вона знаходиться в належному робочому стані та працює ефективно.

Некоректна робота відвантажувального бункера.

Магнітні решітки, якщо вони передбачені в бункерах для відвантаження, необхідно періодично очищати, щоб домішки заліза не переносилися вперед. Сировина, що скидається на конвеєри впускної лінії, транспортується ковшовими елеваторами до бункерів попереднього зважування через каскадні магніти (магнітні сепаратори) і пристрої для видалення джутового шнура (або барабанні сита) для видалення чорних і кольорових домішок, таких як джутові нитки.

Спеціаліст з контролю якості повинен періодично перевіряти станції скидання та бункери попереднього зважування, щоб визначити, чи ефективно перевіряються домішки як на станції скидання, так і на вході в бункери попереднього зважування [33, 34]. Струни джуту, які застрягли на решітках бункера для відвантаження, або в пристроях для видалення джутового шнура, необхідно періодично видаляти та знищувати, спалюючи, інакше вони обов'язково знайдуть свій шлях назад на завод.

Дозування вважається однією з найважливіших і найважливіших операцій у виробництві кормів. Відсутність належного дозування може призвести до зниження однорідності раціону, впливаючи не лише на продуктивність тварин, але й на дотримання нормативних вимог.

Дозаційна секція заводу складається в основному з бункерів попереднього зважування, розвантажувачів бункерів, вагового пристрою, нижнього вагового бункера, ланцюгового конвеєра та елеватора. Формули, що містять різноманітні доступні інгредієнти, що зберігаються в RMG/силосах на основі найменших витрат для виробництва збалансованого концентрованого корму певного типу, надаються для виробництва спеціалістом з питань харчування. Усі такі інгредієнти зберігаються в різних бункерах для попереднього зважування. Завод оснащено автоматичною системою дозування, керованою мікропроцесором, для точного дозування (рис. 1.2).

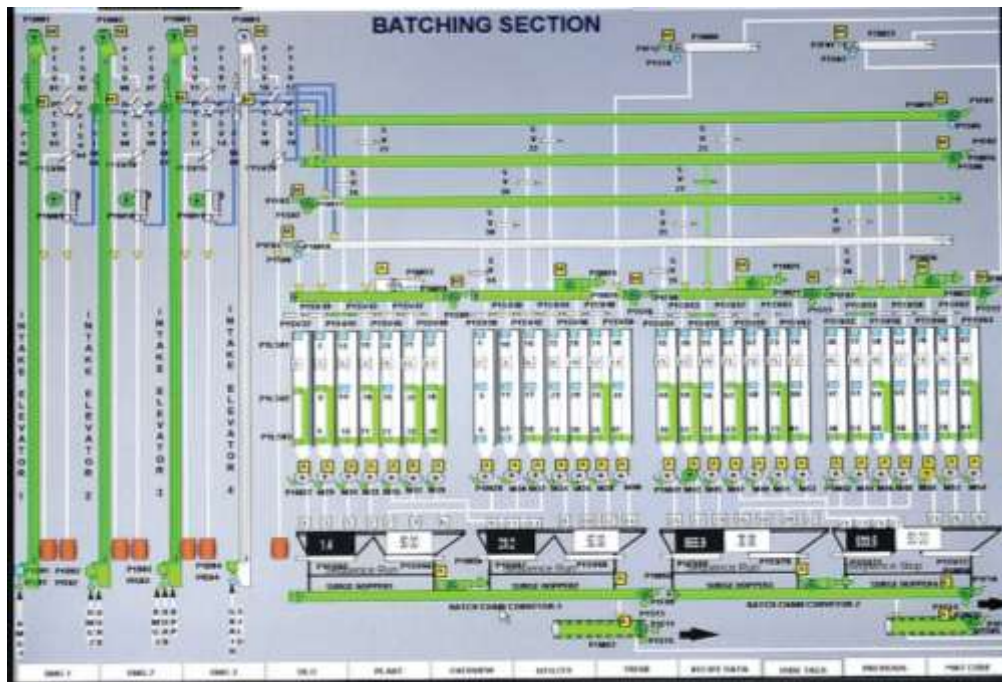


Рисунок 1.2 - Комп'ютеризоване дозування

Згідно з рецептурою корму, бажана кількість кожного інгредієнта вивантажується з бункерів попереднього зважування (рис. 1.3) у ваговий дозатор (через розвантажувальний бункер з VFD для більш точного дозування), щоб отримати повну партію 1,0/1,5/2,0/ 2,5 тонн (відповідно до потужності заводу), включаючи мелясу. Операція дозування здійснюється з диспетчерської. Коли партія готова, вона готова переміщується з вагового пристрою партії в бункер під ваговим приладом партії через пневматичну заслінку, і ваговий пристрій починає приймати наступну партію. Потім повна партія механічно транспортується до бункера над молотковою млином у секції подрібнення через ланцюговий конвеєр партії та елеватор.

Працівник контролю якості повинен періодично перевіряти точність звітів в комп'ютеризованій системі підготовки, щоб гарантувати, що зважування окремої сировини відповідає формулі корму та не має місця великих відхилень від встановленої та досягнутої ваги. Періодично він також повинен перевіряти точність ваг і, якщо необхідно, калібрувати їх.



Рисунок 1.3 - Бункери попереднього зважування

Операція шліфування

Подрібнення є найефективнішою технікою обробки для покращення використання поживних речовин і продуктивності тварин. Для однорідного розміру частинок, що забезпечує кращу якість гранул, уся партія проходить через молотковий млин (тобто 100-відсоткове подрібнення після дозування) перед змішуванням. Таким чином, подрібнення збільшує площу поверхні інгредієнтів партії для покращення швидкості травлення, зменшення сегрегації та проблем змішування. Таким чином, разом з установкою була забезпечена секція подрібнення для подрібнення всієї партії матеріалів до порошкоподібної форми [35, 36]. Система подрібнення складається з бункера, ротаційного живильника з магнітом, подрібнювального млина (молоткового млина; рис. 1.4), збірного бункера під млином, шнекового конвеєра, елеватора та системи аспірації. Подрібнювана сировина через магніт подається на млин ротаційним живильником, де ці матеріали подрібнюються. Після подрібнення вся порція порошку проходить через конвеєр і елеватор і зберігається в бункері над змішувачем.



Рисунок 1.4 - Молотковий млин

Порція з цього бункера автоматично подається в порційний змішувач через пневматичну заслінку. Офіцер з контролю якості повинен забезпечити розмір частинок подрібнених матеріалів для правильного змішування сировини [37, 38]. Він також повинен переконатися, що сито молоткового млина має правильний розмір отворів у міліметрах і не пошкоджене, щоб обмежити мікронні розміри подрібнених частинок у межах встановлених норм.

Процес змішування значною мірою визначає продуктивність усього виробничого процесу та якість кінцевого продукту. Відсутність належного змішування може призвести до зниження однорідності раціону, впливаючи не лише на продуктивність тварин, але й на дотримання нормативних вимог. Змішування замісу в змішувачі періодичної дії відбувається зазвичай це робиться протягом 3-4 хвилин для належного змішування. Точність/однорідність змішування міксеру вказує на те, наскільки ефективно окремий інгредієнт розподіляється між сукупністю інших інгредієнтів. Однорідність виражається коефіцієнтом варіації CV (у відсотках). Хороший

міксер повинен мати $CV \leq 5$ відсотків за менший час змішування. Передбачено блокування, щоб забезпечити змішування в змішувачі лише однієї партії за раз. Офіцер з контролю якості також повинен перевіряти правильність змішування інгредієнтів партії в комбікормі.



Рисунок 1.5 - Міксер періодичної дії

Фактори, що впливають на точність змішування:

- Властивості компонентів: Найкращі результати змішування досягаються, якщо частинки в суміші мають лише невеликі відмінності щодо гранулювання та питомої ваги.

Емпіричне правило:

- Грануляція: відмінності між компонентами макс. 3 мм.
- Насипна щільність: Різниця між компонентами менше $0,5 \text{ т/м}^3$.
- Точність пропорцій: пропорції повинні відповідати вимогам.
- Тип змішувача(конічні, U-подібні).
- Час змішування: індивідуальний для кожного типу змішувача.

Час змішування міксерів конічної форми: 5-20 хв, круглого горизонтального однострічкового змішувача / лопатного міксерів - 3-4 хвилини і горизонтальних двовальних лопатей -1-2 хвилини.

- Додавання рідини: рідини слід додавати після процесу змішування.

Під час обходу заводу фахівець з годівлі тварин повинен переконатися, що оператори обережні щодо наслідків використання меншої або більшої кількості сировини [39, 40]. Він повинен стежити за тим, щоб зважування сировини відповідало формулі корму. Періодично він також повинен перевіряти точність ваг.

Меляса в операціях змішування

Меляса є важливим дешевим джерелом енергії, тому її зазвичай включають у комбікорми. Меляса зберігається в резервуарах-накопичувачах МС. Якість патоки слід перевіряти на її щільність перед перенесенням у резервуар для зберігання.

Партія після змішування в змішувачі періодичної дії механічно подається в бункер для змішаних кормів над змішувачем патоки через елеватор. Змішаний корм подається до змішувача патоки через дозатор втрати ваги для корму, де меляса при температурі приблизно 45-50 °C з нагрівача патоки розпилюється та змішується в контрольованих кількостях. Мелясований корм або транспортується до бункерів для готових кормів для розфасування, якщо корм потрібен у формі пюре, або дозволяється дозріти в невеликому бункері протягом кількох хвилин. Мелясований корм нарешті подається до гранулятора через його живильник і кондиціонер, якщо корм випускається у формі гранул.

З корму, що виходить із змішувача патоки, можуть бути випадково відібрані зразки, щоб перевірити якість меляси, змішаної з кормом. Матеріал можна натерти вручну, і типова текстура та аромат патоки приблизно вкажуть на ступінь вмісту патоки в матеріалі.

Грануляція, робота млина.

Основна мета цієї операції полягає в перетворенні затору в гранульовану форму шляхом змішування з парою. Гранулювання покращує перетравність корму і, отже, краще гранули, краща продуктивність. Секція гранулятора складається з живильника, кондиціонера, гранулятора,

охолоджувача гранул, елеватора, сита для гранул, циклону охолоджувача гранул і його повітрорудки та повітряного шлюзу тощо [41, 42, 43]. Мелясований корм подається з бункера для зберігання в живильник, а потім у кондиціонер, де суха насичена пара змішується з кормом і подається на пелетний млин із контрольованою швидкістю.

Швидкість подачі в гранулювальний млин залежить від стану матриці для гранулювання (якщо матриця нова, вона не почне негайно гранулювати). Гранулювання розпочнеться, коли всі отвори матриці будуть відполіровані та заповнені кормом, стан корму (тобто корм не має бути ні надто вологим, ні надто сухим). Пелетування відбувається за рахунок процесу екструзії. Притискні ролики, розташовані всередині матриці, змушують матеріал проходити через отвори матриці, і коли корм виходить із матриці, він знаходиться у формі гранул.

Довжину пелет можна регулювати за допомогою ножів, які входять до складу машини.

Щоб перевірити роботу гранулятора, фахівець з годівлі тварин повинен перевірити відсоток вологи в кормах перед кондиціонуванням. Він повинен відібрати пробу після того, як інгредієнти ретельно перемішані в камері парового впорскування, і зазначити вміст вологи та температуру, при якій матеріал подається в матрицю гранулятора. Це також може служити індексом вмісту патоки в матеріалі. Після гранулювання він повинен зібрати кілька гарячих гранул, щоб мати уявлення про якість гранул (розбиті порції, дрібні частинки, розмір, гранули тощо). Для ефективного кондиціонування пара повинна бути сухою, температура корму в кондиціонері повинна бути в межах 80-85°C, а вологість до і після кондиціонування повинна становити 12-13 відсотків і 14 відсотків відповідно.

Операція охолодження

Через змішування пари гранули гарячі, тому їх необхідно охолодити, щоб уникнути утворення грудок і погіршення якості корму. Охолодження

пелет здійснюється в охолоджувачі пелет за допомогою індукованої прохолодної тяги повітря. Під час охолодження гранул частина порошку та подрібнених гранул виноситься разом із відпрацьованим гарячим повітрям. Вони відокремлюються циклоном (рис. 3.13) і блоком повітряного шлюзу, і цей матеріал знову подається в гранулювальний млин для повторного гранулювання. Охолоджені гранули транспортуються на сито пелет за допомогою елеватора. У ситі для гранул, подрібнені гранули та порошок відокремлюють від хороших гранул і відправляється на пелетний завод для повторного гранулювання, а хороші гранули зберігаються в бункер для мішків.

Працівник контролю якості повинен переконатися, що гранули, які виходять з охолоджувача пелет, належним чином охолоджені та не містять надлишку вологи. Неправильно охолоджені гранули призведуть до утворення грудок у мішках для зберігання та бункерах.

Операція контролю вологи

Контроль вологості при виробництві кормів для тварин бажаний на кількох етапах виробничого процесу. Оскільки вміст вологи в сировині постійно змінюється, онлайн-вимірювання стало ключовим інструментом для забезпечення оптимальної ефективності та контролю якості. Здатність вимірювати вологість і вносити будь-які коригування під час процесу виробництва корму стає критичною на кількох етапах виробничого циклу.

Переваги

- Зменшення витрат на електроенергію, оскільки правильну кількість енергії, необхідну для сушіння, можна точно розрахувати
- Зменшення кількості відходів
- Постійна, повторювана якість для кінцевого продукту

Моніторинг вологи в сировині, контроль додавання води під час процесу змішування/змішування та, нарешті, перевірка вологості корму у формі гранул не тільки забезпечує стабільну якість кінцевого продукту, але й

дозволить досягти суттєвої економії в виробничий процес [44, 45]. Виробник повинен знати рівні вологи в сировині та мати можливість точно розрахувати кількість вологи, яку потрібно додати до суміші, щоб отримати правильну консистенцію кінцевого продукту. Ці відомі рівні також дозволять виробнику точно розрахувати необхідний час сушіння та, отже, потенційно зменшити витрати на електроенергію.

Розфасовка в мішки

У цьому розділі йдеться про фасування необхідної кількості готової продукції в мішки, зшивання їх і передачу на склад готової продукції. Наповнення мішків здійснюється за допомогою пакетувальних машин, і заповнені мішки зміщуються на готову продукцію рейковим конвеєром після прошивання швейною машиною на шляху. Операція пакування в мішки є напіваавтоматичною [46, 47, 48]. Спочатку запускається головний двигун подачі, і коли приблизно 75 відсотків корму запаковано в мішки, подача перемикається на тонку подачу, щоб регулювати матеріал на повільній швидкості для точного наповнення.

Відповідальний контроль якості повинен переконатися, що гранули належним чином охолоджені та їхній зовнішній вигляд знаходиться в межах нормального діапазону, перш ніж їх помістити в мішки та запечатати. Він також повинен забезпечити відбір зразка для аналізу з кожного мішка та підготовку зведеного зразка зі 100 мішків. Пакувальний матеріал має відповідати стандартним специфікаціям і бути вільним від забруднень.

2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Опис процесу

У виробництві пелет композиція з різної сировини проходить ряд процесів, перш ніж перетворитися на власне пелети. Виробництво пелет - це періодичний процес, який починається з дозування сировини, перш ніж суміш подрібнюють, змішують, екструдують, сушать, покривають маслом і, нарешті, охолоджують. Масив силосів містить різну сировину, необхідну для виготовлення пелет [49, 50, 51]. Кожна сировина служить для різних цілей, деякі забезпечують білок та інші поживні добавки, тоді як інша сировина має більше структурне призначення для самих гранул, як крохмаль, який твердне гранули під тиском і нагріванням. Таким чином, різна сировина сильно відрізняється за ціною та характеристиками під час обробки. Першим кроком у процесі є створення правильного складу різної сировини. Структуру дозувальної ділянки для заводу з виробництва рибних кормів можна побачити на рис. 2.1 і рис. 2.2.

Гвинтові конвеєри позначені на рисунках жовтим кольором. Вони прикріплені на дні кожного силосу, позначеного червоним кольором, і транспортують відповідну сировину до вагового бункера, позначеного зеленим кольором. У випадку нашого заводу є три контейнери для зважування, кожен з яких має різний діапазон у кг. На рис. 2.1 показана найбільша вага, яка дозує до 500-600 кг кожної сировини. малюнок 1.2 показано дві системи дозування, де лівий ваговий бункер дозує сировину в діапазоні 0,1-2 кг, а правий 3-4 кг. Склад сировини залежить від конкретної рецептури, які призначені для виробництва конкретного продукту, при цьому процес намагається якомога точніше дозувати до кількості, зазначеної в рецепті.

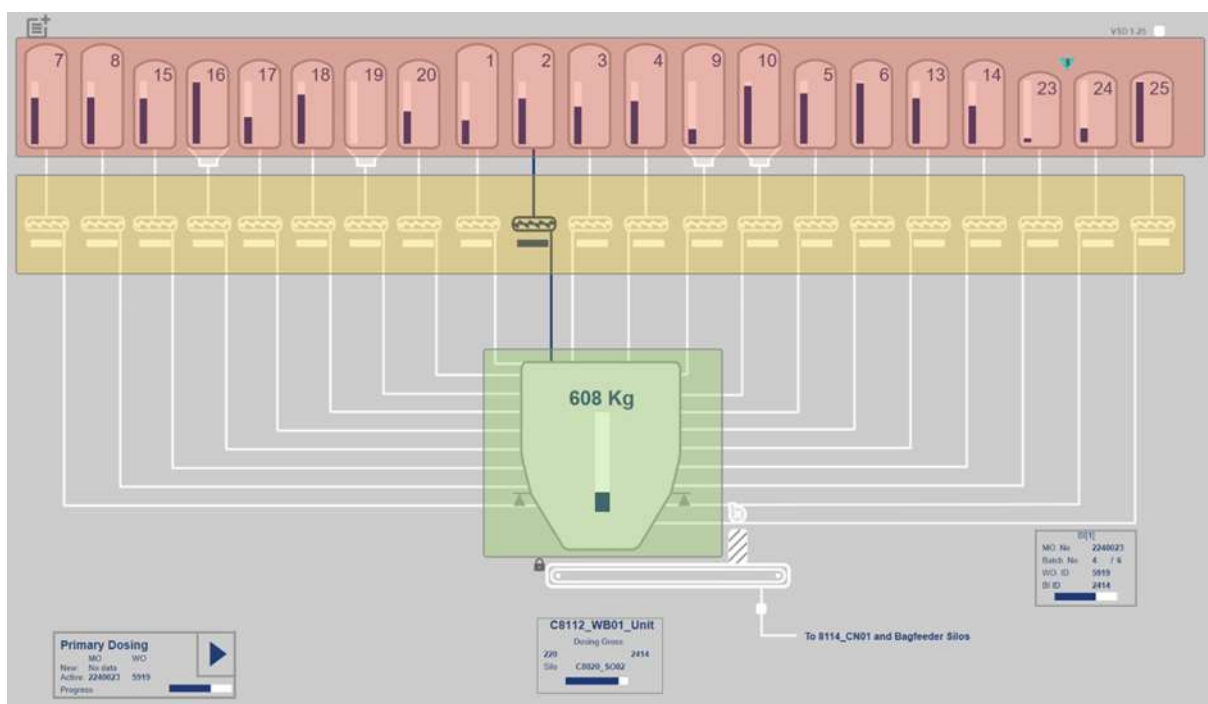


Рисунок 2.1 - Сторінка SCADA первинного дозування

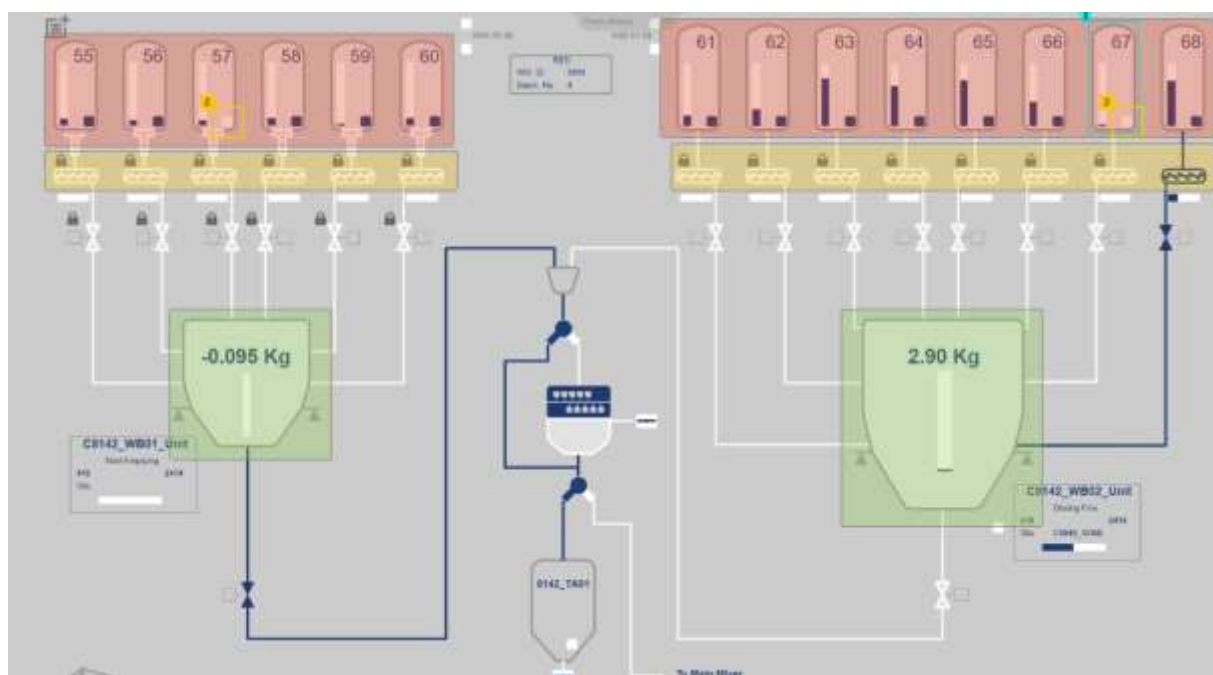


Рисунок 2.2 - Сторінка SCADA мікродозування

2.2. Огляд дозування

Області важливості та потенціалу для покращення нанесено на карту шляхом окремих інтерв'ю з персоналом окремих заводів з виробництва рибних кормів з паралельними виробничими лініями. Однією з головних проблем, з якою вони стикаються, є кількість тривог, які видає поточна система [52, 53]. Тривога спрацьовує, якщо система дозує занадто мало, занадто багато або якщо потік матеріалу падає нижче певного порогу. Зменшення кількості сигналів тривоги є важливим для підвищення уваги операторів і підвищення сприйняття важливості кожного окремого сигналу тривоги.

Сигналізація та, у свою чергу, точність дозування особливо проблематичні, коли починається виробництво нового продукту, або, як у випадку кількох ліній, той самий силос дозується з двох окремих ліній. Інша поширена проблема пов'язана з кількістю параметрів, які використовуються для контролю дозування для поточної системи. Налаштування їх для оптимізації системи складно для розуміння та займає багато часу, оскільки на налаштування витрачається кілька годин на тиждень. Точність системи дозування є задовільною більшу частину часу, але з сировиною, що складається з 70% загальних витрат, можна досягти істотної економії шляхом підвищення точності системи дозування. Порушення в системі дозування також є поширеною проблемою, особливо для менших вагових бункерів. Віб्राції від роботи зовнішнього обладнання та зміни тиску через відкривання та закривання клапана та заслінки. Ці порушення заважають процесу дозування та впливають на якість кінцевого продукту. Аналіз даних необхідний, щоб вивчити недоліки поточної системи та встановити релевантність параметрів, щоб знайти відповідне рішення.

2.2.1. Поточний стан контролю

Розуміння того, як працює поточний контроль дозування, є корисним для подальшого аналізу системи. Це дало б змогу визначити, чи помилки в дозуванні спричинені недоліками в контролері чи щось поза межами контролера. Один ПЛК зберігає логіку для всього заводу та містить логіку дозування. Рис. 2.3 показує потік даних для поточного контрольного рішення. ПЛК отримує рецепт від системи MES і використовує інформацію, отриману від системи MES, щоб визначити, які силоси дозувати.

Таблиця 2.1 показує найважливіші змінні, що використовуються в поточній схемі керування. Гвинтовий конвеєр дозує сировину із заданою швидкістю. Це починається в валовому дозуванні зі швидкістю шнека, визначеною `DoseGross_speed`. Величина, указана у `FineDose`, визначає, наскільки вага знаходиться від заданого значення перед тим, як шнековий конвеєр почне працювати зі швидкістю, визначеною `DoseFine_Speed`. `Inflight` показує кількість сировини, яка знаходиться в повітрі або на шляху після зупинки шнекового конвеєра. `DoseAfter` використовується для компенсації відхилень у системі керування. Шляхом повторного розрахунку відхилення від заданого значення та використання відхилення для зміни тривалості роботи гвинта для наступного циклу дозування. `DoseAfter_Speed` використовується для визначення швидкості після дозування. `FineDose`, `Inflight` та всі змінні швидкості повинні визначатися оператором для кожного шнека в установці. Завод має близько 37 дозуючих шнеків, що робить загальну кількість параметрів для налаштування близько 200.

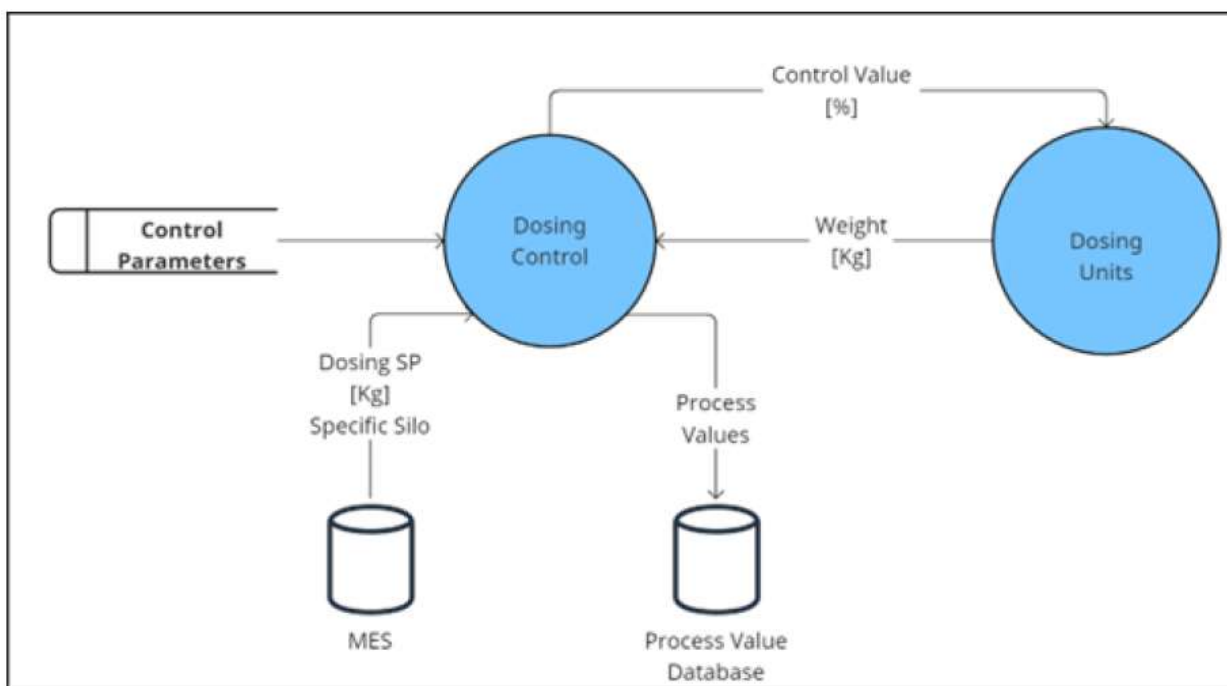


Рисунок 2.3 - Потік даних для процесів із поточною схемою керування

Таблиця 2.1 - Пояснення контрольних змінних

змінна	опис	одиниця
DoseFine	Наведіть курсор, щоб почати більш тонке дозування	кг
DoseAfter	Ітеративно розраховане дозування аміуну	кг
Inflight	Скільки сировини знаходиться в повітрі під час транспортування	кг
DoseFine speed	Точна швидкість дозування	%
DoseGros speed	Загальна швидкість дозування	%
DoseAfter speed	Після дозування швидкість	%

2.3. Аналіз дозування

Перш ніж почати розглядати дані часових рядів, корисно переглянути пакетні дані. Рис. 2.4 показує різні компоненти ІТ-інфраструктури заводу та їхнє з'єднання. База даних значень процесу — це сервер SQL, що містить дані часових рядів для всіх об'єктів на сайті, і через цю базу даних пакетні

дані витягуються за допомогою процедури зберігання, функції, запрограмованої як сценарій SQL. Таблиця 2.2 показує огляд різних тегів, які запитуються разом із коротким поясненням.

Таблиця 2.2 - Змінні, пов'язані з дозуванням

змінна	опис	одиниця
DoseTotal	Загальна кількість, дозована на шкалі	кг
DoseTimeStart	Час початку дозування	час
ScrewInputTotal	Накопичений гвинтовий вхід	%·s
ScrewWeightRatio	Співвідношення між дозованою кількістю та накопиченим шнековим входом	кг/ %·s
ScrewIdleTime	Різниця в DoseTimeStart для кожної партії на кожному гвинті	секунда
SiloQuantity	Розрахована кількість у силосі	кг
Temperature	Кімнатна температура для ділянки	°C
ddAfter	Затримка подачі матеріалу на ваги після зупинки шнека	секунда

Аналіз цих точок даних має допомогти з'ясувати релевантність кожного параметра для системи.

Відхилення ваги

Щоб отримати відповідну інформацію з даних, зібраних із поточної системи, важливо зрозуміти, як працює поточна система. Поточна система дозування дозує сировину поетапно: грубе, дрібне та післядозування. Для кожного з цих етапів задане значення швидкості призначається вручну, а тривалість точного дозування визначається ітераційно. Релевантність зовнішніх параметрів має ґрунтуватися на продуктивності існуючої моделі. Розраховано кореляцію між відхиленням ваги та абсолютним z-показником для зовнішніх параметрів для кількох партій. Відхилення від середнього для кожного параметра повинні впливати на відхилення ваги, якщо воно взагалі впливає на матеріал. Вважається, що ітераційний алгоритм погано

справляється з відхиленнями параметрів і сценаріями за межі нормальної робочої точки, оскільки результат попереднього пакету стає все більш нерелевантним із збільшенням відхилення. Результати можна побачити на рис. 2.5, 2.6, і 2.7.

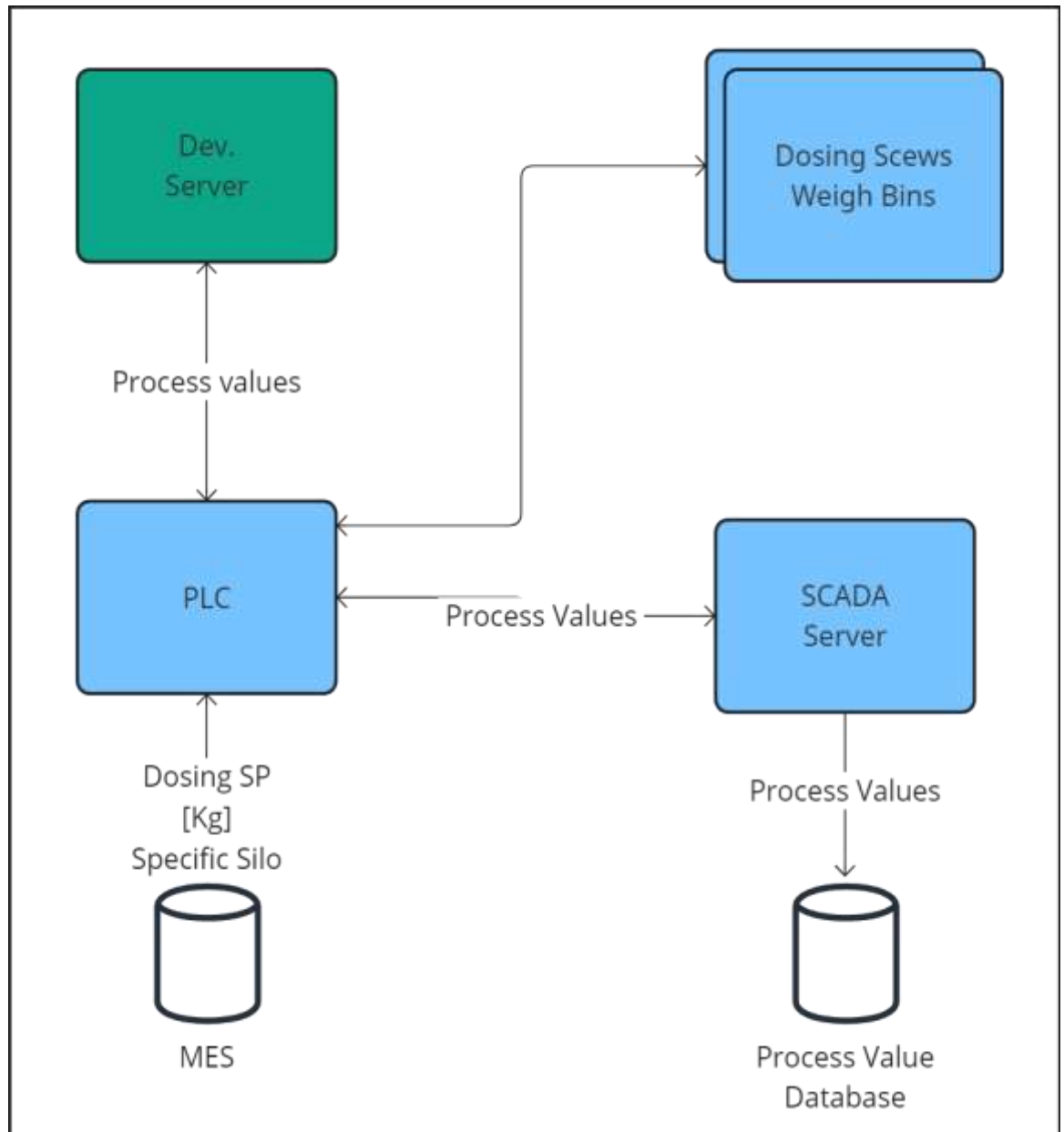


Рисунок 2.4 - Потік даних для компонентів у поточному процесі

Кожна з 3 окремих гілок представляє параметри, причому кожна смужка є окремим гвинтом (унікальна сировина). Усі параметри мають

значний ступінь кореляції, причому ступінь кореляції різниться між різними сировинними матеріалами. Виходячи з результатів, наведених на 3 стовпчикових діаграмах, час простою шнека, температура та кількість у силосі впливають на системи дозування. З деякою сировиною, як-от силос 25, високо схильні до змін, тоді як інші, як силос 2, не мають істотного ефекту.

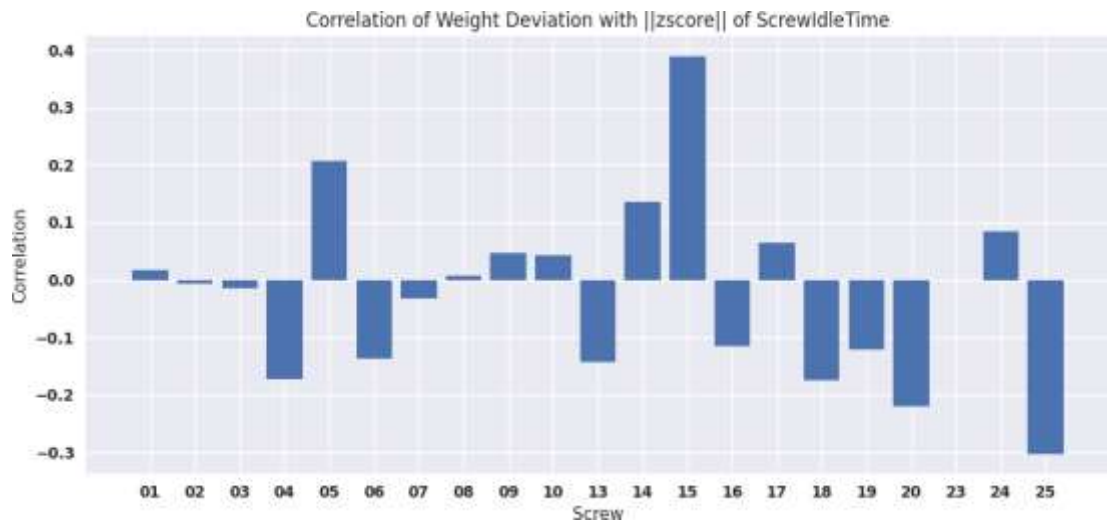


Рисунок 2.5 – Z - показник кореляції між коефіцієнтом ваги гвинта та ScrewIdleTime

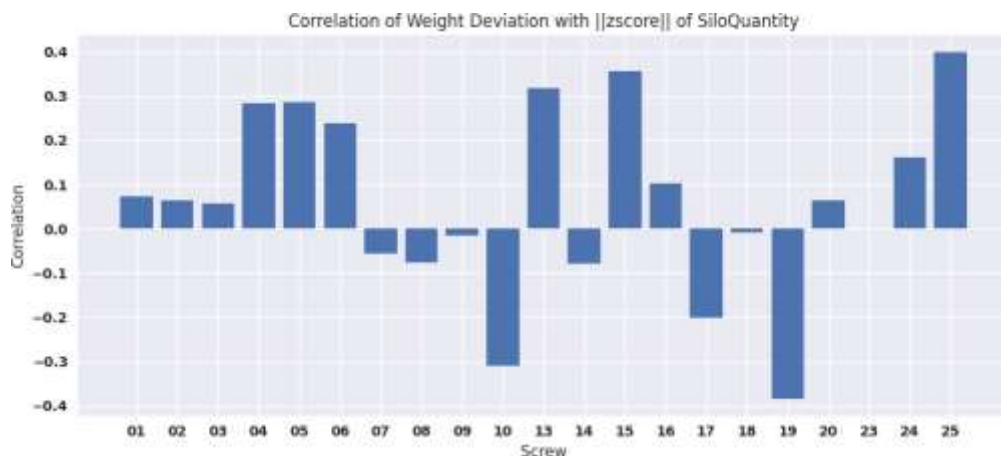


Рисунок 2.6 - Z-показник між коефіцієнтом маси шнека та SiloQuant

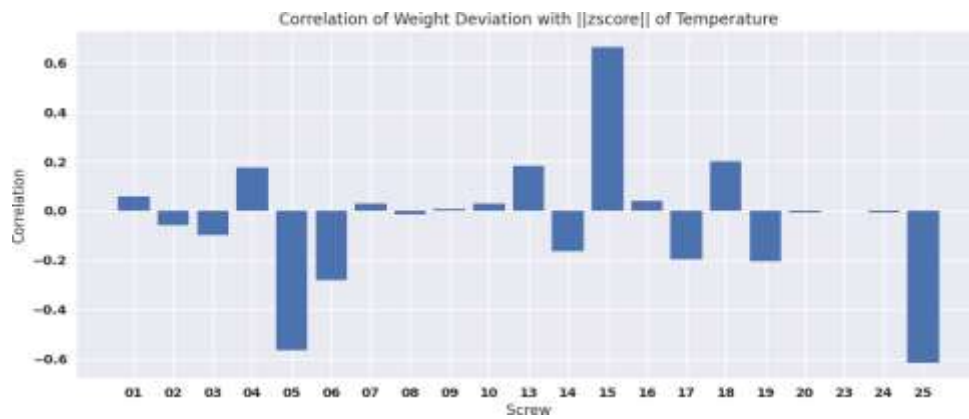


Рисунок 2.7 - Z-показник між співвідношенням ваги гвинта та температурою

Щільність матеріалу

Намагаючись оминати недоліки існуючої системи та все ще намагатися оцінити їїрелевантність параметрів здійснюється шляхом обчислення кореляції між відношенням зміни ваги до накопиченого гвинтового входу для кожного параметра. Більш високий коефіцієнт повинен вказувати на більшу щільність сировини, що необхідно враховувати. Рисунки 2.8, 2.9, і 2.10 показують графік для розрахунку кореляції так само, як і для z-показників. Графіки дають однакове розуміння, оскільки існує значна варіація у відповідності кожного параметра для кожної сировини. Гістограми вказують на те, що на щільність різним ступенем для кожної сировини впливають відповідні змінні.

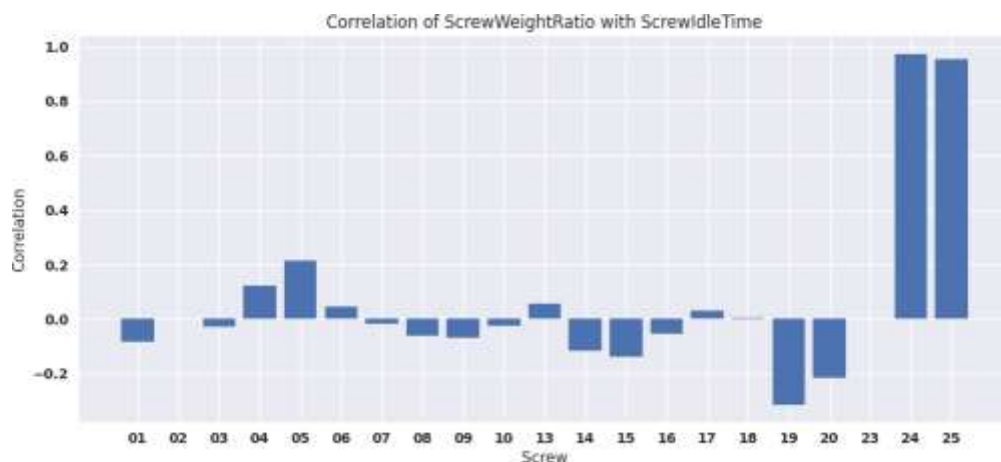


Рисунок 2.8 - Кореляція між ScrewWeightRatio і ScrewIdleTime

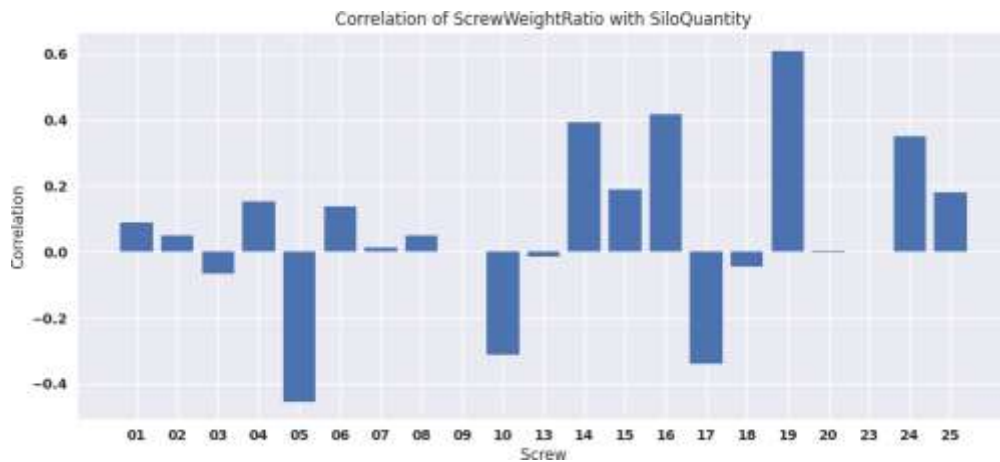


Рисунок 2.9 - Кореляція між ScrewWeightRatio і SiloQuantity

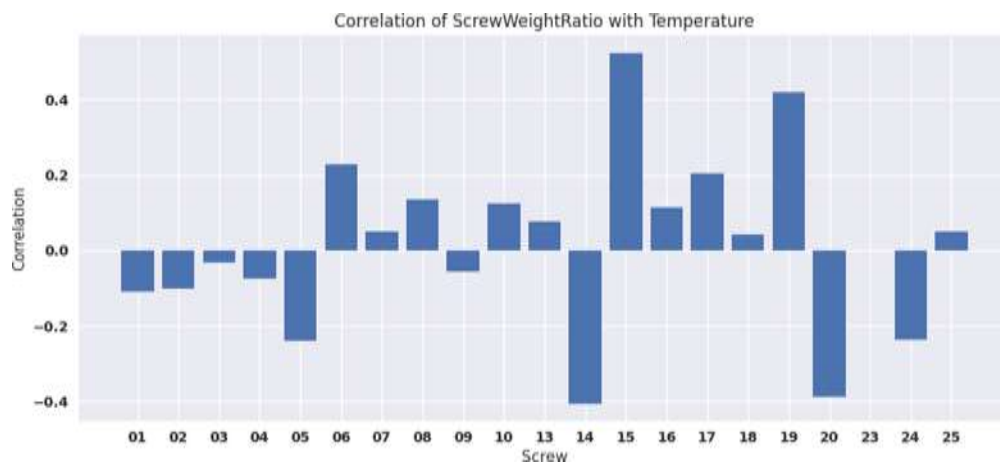


Рисунок 2.10 - Співвідношення між вагою гвинта та температурою

Аналіз даних часових рядів і нелінійність

Переглядаючи часові ряди даних для процесу, можна краще зрозуміти поточний процес, контроль і його вплив на вагу. Мета поточного процесу контролю ідентична новому, що розробляється. Дані часових рядів, у зв'язку з цим, проясняють, як це виконується наразі та чому це не вдається в деяких областях. Дані часових рядів, у свою чергу, будуть корисні для пошуку належної схеми контролю. Рисунки 2.11, 2.12, і 2.13 показують три різні види сировини, що дозуються (з рештою графіків, доступних у додатку), кожен з різним заданим значенням і гвинтом дозування. З дев'яти різних часових рядів показників дозування сировини було обрано три різні за своєю суттю

характеристики вхідного відгуку. На рисунку 2.13 показані характеристики відгуку гвинта для гвинта номер 17.

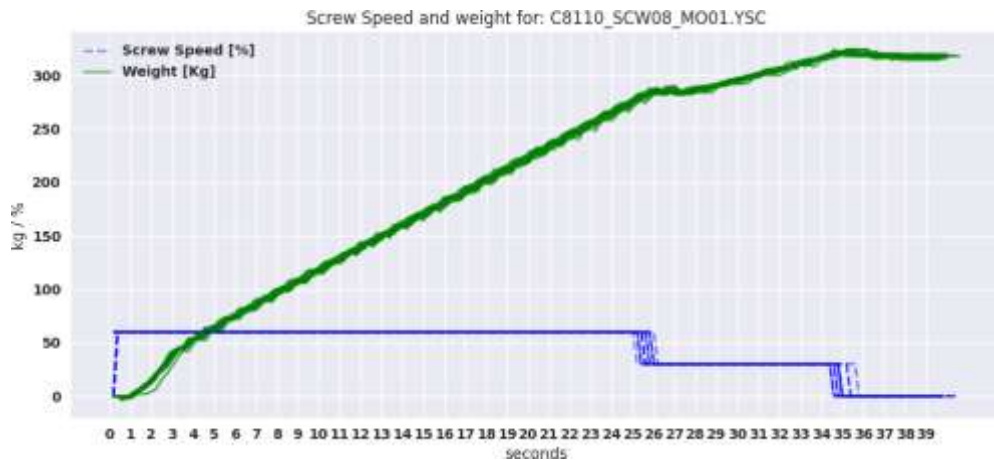


Рисунок 2.11 - Контроль дозування для гвинта 8 з існуючою системою керування

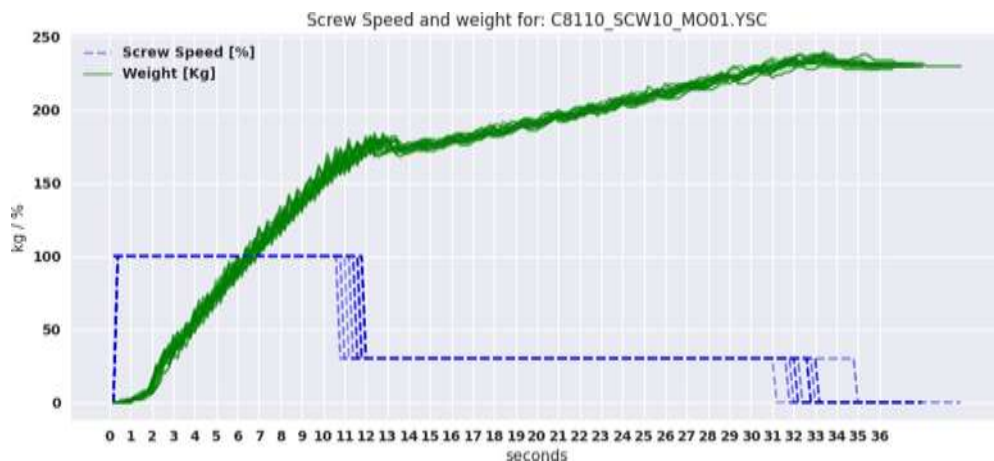


Рисунок 2.12 - Контроль дозування для гвинта 10 з існуючою системою керування

Кілька циклів дозування наносяться один на одного, щоб забезпечити більш точну інтерпретацію даних. Для гвинта 17 на малюнку 1.13, гвинт дозування починає працювати на 100% протягом приблизно 3 секунд, і вага значно перевищує значення. Очевидне перевищення вносить кілька проблем у поточний процес контролю. Дозування завершується надто рано, тому

необхідно повторити ту саму процедуру дозування. Під час повторної спроби процедури дозування генеруються сигнали тривоги та вводяться нові перевищення, коли вага наближається до заданого значення.

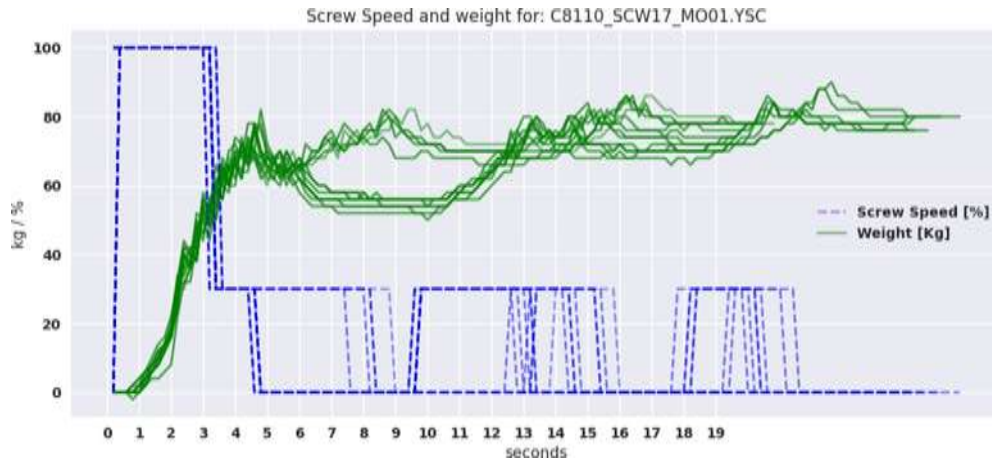


Рисунок 2.13 - Контроль дозування для гвинта 17 з існуючою системою керування

Повторні спроби дозування можна побачити по тому, що швидкість шнека знижується до 0%, а потім підвищується до 30% для повторної спроби. І наявність перевищення, і його затримка свідчать про те, що для деяких видів сировини дозування має нелінійний характер.

Рисунок 2.11 показує гвинт номер 8 і його відповідну вагу. Це приклад того, як контроль дозування працює належним чином. При уважному розгляді переходу між 100% і 30% можна побачити незначне перевищення. Шнек 8 має встановлене значення ваги близько 300 кг, порівняно з 80 кг для шнека 17. Відносні швидкості шнека в цьому випадку набагато нижчі, завдяки чому характеристики дозування виглядають значно більш лінійними порівняно з дозуванням за допомогою шнека 17. Шнек 10 показано на рис. 2.12 демонструє майже ті самі характеристики, що й гвинт 8, але задане значення дозування інше. Ще одна відмінність - це коливання ваги. При швидкості шнека 100% коливання значно вищі, ніж при швидкості шнека

30%. Пояснення цьому можна знайти в тому, як працює дозуючий шнек. Гвинт розміщений усередині труби, транспортуючи матеріал через рухомі камери. Зі збільшенням швидкості шнека кишені матеріалу будуть доставлятися до вагового бункера серіями.

2.4. Аналіз завдань розробки

При пошуку нового підходу необхідно враховувати аналіз дозування та аналіз даних для дозування сировини. Динаміка, нелінійність, невизначеності та збурення системи дозування повинні бути оброблені потенційним рішенням. Управління зворотним зв'язком, керування машинним навчанням, передбачуване керування моделлю та ітераційне керування навчанням — усі відповідні рішення проблеми. Контролери зі зворотним зв'язком є одними з найпоширеніших типів регуляторів у величезній кількості галузей промисловості, зокрема ПІД-регулятор. Основною проблемою при управлінні зі зворотним зв'язком є нестабільність схеми керування. Необхідно знайти правильні параметри керування, щоб зменшити ризик нестабільності та забезпечити адекватну ефективність керування [2, 48]. При використанні контролера зі зворотним зв'язком можна використовувати нелінійний зважений зворотний зв'язок для створення динаміки контролера, яка є більш бажаною у випадку дозування сировини. Для того, щоб керування зі зворотним зв'язком було застосоване у випадку дозування сировини, параметри керування мають бути самоналаштовані. З розрахунковою моделлю дозування можна використати алгоритм мінімізації проти індексу ефективності, щоб знайти ідеальні параметри [3, 49].

В рамках керування машинним навчанням для керування системою можна використовувати алгоритм навчання з підкріпленням. Перевага використання Reinforcement Learning полягає в тому, що він вільний від моделі, але потребує багато обчислень і великої кількості даних. Алгоритм

навчання з підкріпленням також повинен буде «пробувати» і «зазнавати невдач», що в промислових застосуваннях може бути неможливим або економічно недоцільним [4, 50]. Ітеративний контроль навчання також може бути використаний, популярний метод для пакетних процесів. Версія ILC вже є. Його недолік було підкреслено в попередньому огляді та аналізі дозування. Якщо процес виходить за межі нормальної робочої точки або процес зазнає збоїв під час дозування, продуктивність керування почне погіршуватися. Третім методом керування є прогнозоване керування моделлю, яке краще справлятиметься з внутрішніми збуреннями, за умов наявності достатньо точної моделі. Крім того, обчислювальна ефективність повинна бути достатньо високою для модельного прогнозного контролера.

Обговорюється ряд підходів до контролю. Необхідна модельна оцінка. Тому важливо мати хорошу стратегію для оцінки моделі. Розрахункова модель має бути якомога простою, але при цьому мати можливість підібрати загальні характеристики системи. Стратегія оцінки моделі також повинна враховувати параметри моделі, що змінюються в часі. Робота з механічним обладнанням у реальному промисловому процесі призведе до зміни параметрів моделі з часом через знос, технічне обслуговування, зміни в процесі тощо [5, 51].

3 КОСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

Виходячи з огляду літератури, низка рішень може виявитися життєздатною щодо дозування сировини. У пошуку остаточного рішення складність повинна бути мінімальною, дотримуючись усіх вимог промислового процесу. Перегляд дозування та аналіз дозування на основі поточної схеми керування певною мірою обмежують наше розуміння того, як система реагує, і користі нової системи керування. Для кращого розуміння системи та потенційних нових перешкод було випробувано кілька методів контролю дозування, кожен з яких забезпечує краще розуміння процесу. Різні схеми керування розглядаються через ітераційний процес із збільшенням складності для кожного кроку.

Перед початком розробки контролера необхідно встановити архітектуру керування. Кожен бункер в існуючій схемі контролера використовує ексклюзивний контролер, отже, велика кількість параметрів. На користь зменшення параметрів можна було б мати єдиний контролер для кожного бункера зважування. Це створило б додаткові проблеми для потенційних контролерів, оскільки вони повинні враховувати різні характеристики сировини. Натомість зберігається архітектура контролера з вихідної схеми контролера.

3.1. Контролер пропорційного зворотного зв'язку

Першим розробленим контролером дозування є Р-контролер. Наявність додаткової інтегральної та похідної частин не буде корисною для процесу дозування. При дозуванні матеріал додається, а не віднімається, сам процес інтегрується. Таким чином, інтегральний контролер зворотного зв'язку не буде використовуватися. Контролер похідного зворотного зв'язку з тієї ж

причини був би неактуальним, процес не намагався досягти стійкого стану, тобто немає потреби компенсувати зміни в потоці.

Найпростіша і одна з найпоширеніших форм контролю. Контролер пропорційного зворотного зв'язку створює керуючий вхід, пропорційний відхиленню між станом і заданим значенням. Сам по собі Р-контролер не працював би для дозування сировини. Коли відхилення стає меншим, пропорційне посилення також зменшується, і стан ніколи не досягне бажаного заданого значення, а натомість зблизиться до нього. Асимптотична поведінка також стає проблематичною при розгляді часу дозування. Це має бути досить швидко, щоб не ввести вузькі місця в виробничій лінії. Рішенням може бути збільшення підсилення, але це, у свою чергу, збільшить нестабільність системи керування.

3.1.1. Евристика та міркування для пропорційного контролера

Щоб Р-контролер міг керувати системою дозування, потрібна певна евристична логіка. Початкова швидкість повинна визначатися заданим значенням, помноженим на коефіцієнт. Це гарантує, що менші кількості дозування починаються з менших швидкостей, зменшуючи потенційні перевищення та нелінійності. Також додається зміщення, щоб гарантувати, що гвинт не працює надто повільно, щоб завершити дозування. Зсув пропорційний початковій швидкості, яка визначається коефіцієнтом. Нарешті, також додається логіка, коли Р-контролер налаштований на активацію. Контролер працює з початковою швидкістю, доки вага не досягне заданого відсотка заданого значення. Тоді пропорційне посилення стає активним.

Початкові параметри

Початковий контрольний вихід:

$$cv_{ini} = sp * cv_{ini_k} \quad (2.1)$$

Лімітований контрольний вихід:

$$cv_{ini} \begin{cases} 100 & \text{if } cv_{ini} > 100, \\ u_{ini_k} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.2)$$

Випередження:

$$C = cv_{ini} * C_k \quad (2.3)$$

P-контроль:

$$cv(k) \begin{cases} cv_{ini} & \text{if } e > cp \\ cv_{ini} * (1 - pv/sp) * K_p & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$cv(k) \begin{cases} C & \text{if } cv(k) < C \\ cv_{ini} & \text{if } cv(k) > cv_{ini} \\ 0 & \text{if } e < \text{cutoff} \\ cv(k) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

де, C - мінімальний вихідний сигнал керування;

cv_{ini} - початковий керуючий вихід;

cv_{ini_k} - це коефіцієнт підсилення для визначення вихідного вихідного сигналу керування;

cutoff - це точка, де контрольний вихід встановлено на 0;

cp - «Контрольною точкою», де р-регулятор приймає початкову швидкість;

sp - задане значення;

$cv(t)$ – контрольний вихід;

K_p - пропорційне посилення;

$e(t)$ - сигнал помилки, який визначається як різниця між бажаним заданим значенням і фактичною змінною процесу.

Для того, щоб Р-контролер міг бути застосований до системи дозування під рукою, ряд евристичних логічних тверджень введено на місце для забезпечення стабільності при збереженні швидкості дозування в прийнятних межах. З урахуванням цих міркувань до схеми Р-регулятора додається ряд нових змінних. У старій схемі керування було 5 параметрів для налаштування, у той час як цей Р-контролер має таку саму кількість, що не дало реального покращення зручності використання. Це також ускладнює розповсюдження контролера на інші системи дозування. Тим не менш, випробувати Р-контролер корисно, щоб отримати додаткове уявлення про те, як система поводить себе під час безперервного керування, що не стосується поточної системи контролю.

Починаючи з Р-контролера, апріорні дані з систем дозування включаються в схеми керування дозуванням і використовуються для зменшення невизначеності станів. Це робиться шляхом використання моделі системи та фільтрації вимірювань.

Вибір хорошої загальної структури моделі є непохитним для того, щоб модель пояснила якомога більше відмінностей у системі, водночас зберігаючи складність до мінімуму. Якщо це можливо або достатньо, оцінювана модель має бути лінійною. Крім того, підтримувати швидкість обчислень і мати можливість використовувати класичну теорію керування. Моделі мають передбачати швидкість зміни в кожному бункері зважування. Причому кожен силос для сировини з відповідним шнеком представлений окремими моделями.

При розробці моделі використовується проста лінійна модель першого порядку для прогнозування похідної ваги від швидкостей шнека з

додаванням вхідних даних із запізненням. Загальна лінійна модель першого порядку використовується замість моделі, заснованої на фізиці, для її загальності, без знання того, як зовнішні фактори впливають на модель, метод проб і помилок з різними затримками та нелінійними умовами може виявитися життєздатним як рішення загального призначення. Дискретна різниця ваги в кг є залежною змінною, а витрати гвинтів у відсотках є незалежною змінною.

Кожна одиниця дозування сировини складається з кількох аспектів, що впливають на модель, що підлягає оцінці: специфічна сировина, обладнання для дозування та масштаб. Кожен із цих аспектів змінюватиметься під час виробництва та з часом. Щоб впоратися з цим, слід використовувати реальну оцінку моделі. Системні зміни враховуються шляхом впровадження вхідних даних і оцінювання моделі в реальному часі. Існує кілька способів виконання оцінки в реальному часі, причому ковзне вікно вибрано як найбільш практичне та просте у реалізації рішення. Вікно попередньо визначеної довжини містить попередні дані процесу, нові дані додаються до вікна, а найстаріші дані видаляються, щоб підтримувати встановлений розмір для навчальних даних. Потім модель оцінюється знову з оновленим вікном. При оцінці моделі для визначення параметрів моделі використовується звичайний метод найменших квадратів.

Зв'язок між швидкістю шнека та різницею ваги може виявитися нелінійним за своєю природою для деяких дозувальних одиниць. В ідеалі це має бути вирішено, щоб отримати кращу відповідність моделі, тоді як модель все ще можна перенести до представлення простору станів. Цю проблему можна вирішити, додавши до моделі експоненціальні версії швидкості гвинта, наприклад квадрат швидкості гвинта або квадратний корінь із швидкості гвинта.

Лінійна модель визначається як:

$$\Delta \hat{w}(k+1) = b_{1,1}cv_1(k) + b_{1,2}cv_2(k) + \dots + b_{n,m}cv_m(k-n) \quad (2.6)$$

Формула звичайних найменших квадратів (OLS) визначається так:

$$\hat{\beta} = (\mathbf{U}^T \mathbf{U} + \lambda * \mathbf{I})^{-1} \mathbf{U}^T \Delta \mathbf{w} \quad (2.7)$$

де:

$\hat{\beta}$ – оцінений вектор параметрів, $\hat{\beta} = [b_{1,1} \quad \dots \quad b_{n,m}]$.

$\mathbf{U}$ - двовимірна матриця незалежних змінних, що складається з векторів з керуючими входами.

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{cv}(0)^T \\ \vdots \\ \mathbf{cv}(Np)^T \end{bmatrix}$$

$\Delta \mathbf{w}$ — вектор залежної змінної.

$$\Delta \mathbf{w} = \begin{bmatrix} \Delta w(0) \\ \vdots \\ \Delta w(Np) \end{bmatrix}$$

Δw – різниця ваги в кг між кроками часу в , $w = w(k) - w(k-1)$.

$\mathbf{cv}(k)$ - вектор, що містить керуючі входи.

$$\mathbf{cv}(k) = \begin{bmatrix} cv_1(k) \\ \vdots \\ cv_m(k) \end{bmatrix}$$

b_n - вектори коефіцієнтів для кожного лагованого тимчасового кроку,
 $b_n = [b_{n,1} \quad \dots \quad b_{n,m}]$.

λ - коефіцієнт, доданий для уникнення сингулярних матриць.

N_p – довжина розсувного вікна.

$cv_m(k)$ - керуючі входи.

n - кількість лагованих змінних.

m - кількість вхідних функцій.

Модель стаціонарного простору

Для перенесення лінійної моделі OLS в модель простору станів, використовується більш загальне формулювання. Якщо модель, що представляє дозування, має залишатися лінійною, зміни, внесені до моделі, легко впроваджуються в програму дозування. Вектор стану містить вагу та похідну від ваги, а матриця стану накопичує похідну від ваги. Вхідний вектор керування приймає екзогенні змінні, такі як швидкість шнека, і, якщо застосовно, лаговані та пропорційні варіації швидкостей шнека. Вхідна матриця містить коефіцієнти, знайдені OLS, які додаються до стану вагової похідної.

Модель простору станів задана:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned}$$

де:

$x(k)$ вектор стану;

$$x(k) = \begin{bmatrix} w(k) \\ \Delta w(k) \end{bmatrix}$$

$u(k)$ - вхідний вектор керування $u(k) = \mathbf{c} \mathbf{v}(k)$;

$y(k)$ - вихідний вектор;

A - матриця стану;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

B - вхідна матриця;

$$B = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 \\ \hat{\beta} \end{bmatrix}$$

C - вихідна матриця;

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2. Фільтрування

Як видно з аналізу дозування, бункер для зважування відчуває значні коливання через камери шнекового конвеєра, що транспортують сировину до бункера для зважування. Крім того, деякі з менших бункерів для зважування відчують значні перешкоди, які самі по собі можуть виграти від фільтра.

Якщо похідна ваги використовуватиметься контролером з кількома станами, коливання, викликані гвинтовою камерою, швидше за все, створять нестабільний контролер. За допомогою аналізу Фур'є знайдено гармоніки шуму та процесу. На основі отриманого аналізу визначається частота зрізу.

Фільтр низьких частот

Фільтр низьких частот з правильною частотою зрізу повинен мати можливість послабити шум в оцінці похідної ваги. Зазвичай

використовуються фільтри низьких частот, що спрощує впровадження, і в цьому випадку вони попередньо закодовані в ПЛК. Потенційна проблема при використанні фільтра низьких частот полягає в тому, як він обробляє перешкоди; фільтру може знадобитися значно низька частота зрізу. Це, у свою чергу, зробило б реакцію на зміни похідної гвинта повільною, що могло б бути проблематичним, якби похідну ваги використовували в контролі.

Фільтр низьких частот розроблено з частотою зрізу, визначеною за допомогою аналізу Фур'є системи, перш ніж його перевірити на кількох дозуючих гвинтах.

Фільтр Калмана

У разі неадекватності розробляється фільтр Калмана. Фільтр Калмана використовує модель системи для прогнозування наступного кроку та використовує це разом із вимірюванням, щоб знайти оцінку, яка врівноважує прогнозоване та виміряне значення. З уже встановленою моделлю, що передбачає вагову похідну, фільтр Калмана допомагає передбачити як вагову похідну, так і послабити збурення. Фільтр Калмана призначений для фільтрації білого гауссового шуму, який відображається в коваріаційній матриці шуму процесу та спостереження. Знайти справжню коваріаційну матрицю складно; замість цього створюються початкові оцінки, які потім налаштовуються вручну на основі проб і помилок.

Розглядаючи середню квадратичну похибку (MSE), статистичну міру того, наскільки добре підігнана модель, MSE з ряду перевірок моделі використовується для кожного бункера зважування. MSE використовується для похибки дисперсії як для ваги, так і для похідної ваги для прогнозів. Можна вважати, що коваріація між вагою та різницею ваги позитивно корельована. Тому початкова коваріація створюється з добутком двох дисперсій.

Для матриці помилок коваріації вимірювання дисперсію ваги та похідної ваги важче ініціалізувати. Для визначення дисперсії

використовуються емпіричні методи. Оцінена модель використовується для прогнозування ваги на основі вхідних даних гвинта. Протягом більш коротких періодів це функціонує як реальний стан порівняно з вимірним значенням, яке зазнає збурень. Залишок між прогнозом і вимірюванням потім використовується для визначення дисперсії. За один і той самий період похідна визначається як для вимірювання, так і для прогнозу, потім це використовується для визначення дисперсії похибки для похідної. Обидві знайдені коваріаційні матриці є початковими припущеннями. Шляхом проб і помилок коваріаційні матриці коригуються, щоб отримати бажану поведінку. Тонкощі фільтра Калмана можна зрозуміти через [6, 18].

Рівняння фільтра Калмана задаються так:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k|k-1} &= A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_k \\ P_{k|k-1} &= AP_{k-1|k-1}A^T + Q \\ K_k &= P_{k|k-1}H^T(HP_{k|k-1}H^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1}) \\ P_{k|k} &= (I - K_kH)P_{k|k-1}\end{aligned}$$

де:

$\hat{x}_{k|k-1}$, $\hat{x}_{k|k}$, A , B уже визначені в підрозділі для формулювання простору станів;

$\hat{x}_{k|k-1}$ – апріорна оцінка стану;

$\hat{x}_{k|k}$ – апостериорна оцінка стану;

$P_{k|k-1}$ – коваріація помилки апріорної оцінки;

$P_{k|k}$ – коваріація помилки апостериорної оцінки;

K_k – приріст Калмана;

A – модель переходу стану;

B - модель керуючого входу;

H - модель вимірювання, визначена як

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Q - коваріація шуму передбачення, визначена як:

$$Q = \begin{bmatrix} V_w & V_{cov} \\ V_{cov} & V_{\Delta w} \end{bmatrix};$$

Початково:

$$V_w = V_{\Delta w} = \text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta w_i - \Delta \hat{w}_i)^2$$

$$V_{cov} = V_w V_{\Delta w}$$

де n — це тривалість усього набору даних перевірки,

R - коваріація шуму вимірювання, визначена як:

$$R = \begin{bmatrix} W_w & W_{cov} \\ W_{cov} & W_{\Delta w} \end{bmatrix}$$

Вков $V_{\Delta w}$

Початково:

$$W_w = \frac{1}{n} \sum_i^n (w_i - \hat{w}_i)^2$$

$$W_{\Delta w} = \frac{1}{n} \sum_i^n (\Delta w_i - \Delta \hat{w}_i)^2$$

$$W_{cov} = W_w W_{\Delta w}$$

Оскільки i -н є періодом, протягом якого процес відчуває порушення,

v_w і $v_{\Delta w}$ – дисперсія для помилки між прогнозом і справжнім станом;

w_w і $v_{\Delta w}$ – дисперсія похибки між вимірюванням і справжнім станом;

v_{cov} і w_{cov} - коваріація помилки між дисперсією для кожного стану;

u_k - вектор керування;

z_k - фактичне вимірювання.

3.3. Контролер зворотного зв'язку з кількома станами

Ряд евристик і міркувань, доданих до P-Controller, можна замінити рахунок наявності окремого контролера для матеріального потоку. Додавши контролер на основі потоку матеріалу, потік матеріалу до кінця циклу дозування забезпечується, якщо це можливо. Це досягається за допомогою вбудованого контролера, що базується на витраті та заданому значенні витрати. малюнок 2.1 показує блок-схему процесу без будь-яких додаткових евристик або міркувань.

Під час дозування бажано максимізувати швидкість потоку матеріалу до кінця циклу дозування, коли потрібний повільніший потік матеріалу. Це робиться для того, щоб мінімізувати тривалість дозування, уникаючи перевищень до кінця. Це може суперечити наявності статичного заданого значення для потоку, і це потрібно вирішити. Стабільність контролера, що використовує похідну, також викликає занепокоєння, особливо якщо бункери зважування піддаються перешкодам.

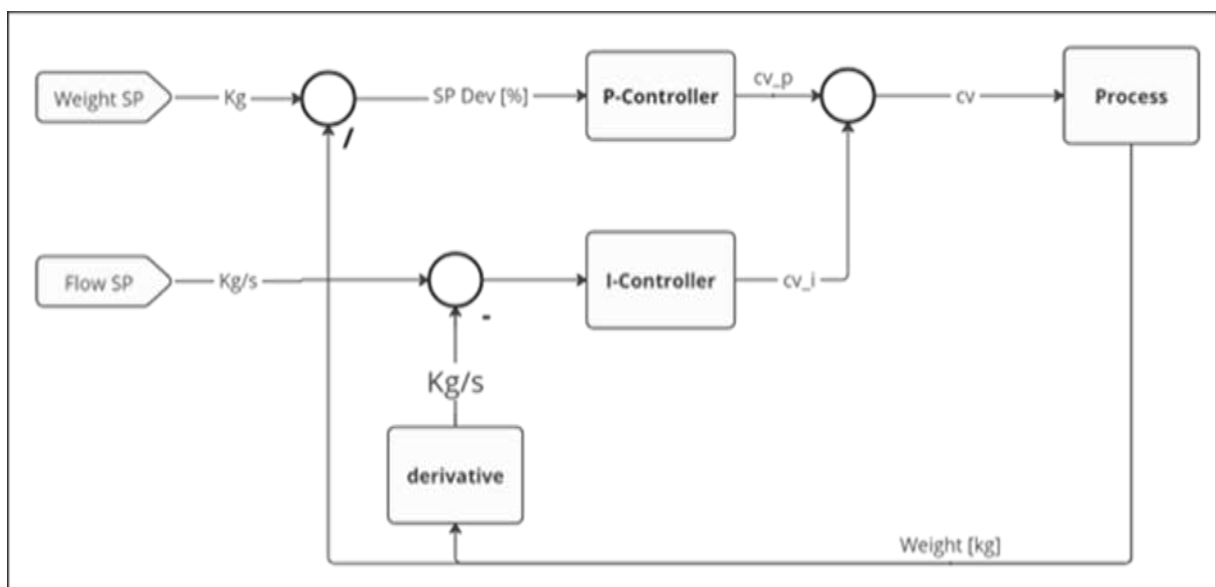


Рисунок 3.1 - Блок-схема керування зворотним зв'язком із кількома станами

Евристика та міркування

Для врахування збурень у виміряній/розрахованій швидкості потоку використовується менший коефіцієнт посилення для інтегруючої частини керування потоком. Це може призвести до інших проблем у системі, яка реагує надто повільно. Тому накопичена змінна ініціалізується перед використанням.

Задане значення потоку матеріалу має відображати ідеальну швидкість потоку наприкінці циклу дозування, тому воно буде занадто низьким для більшої частини циклу дозування. Це адресовано шляхом активації інтегруючого контролера витрати, коли вага досягає певного відсотка заданого значення. Визначаючи, коли зупинити введення шнека, розрахункова модель використовує поточну швидкість шнека для прогнозування ваги на кілька кроків у майбутньому. Якщо майбутня вага досягає граничної точки, визначеної у відсотках від заданої величини, контролер зупиняється. Таким чином, однакову точку відсічення можна застосувати до всіх дозуючих одиниць.

Наявність додаткового контролера для потоку гарантує, що контролер доставляє сировину до бункера зважування, якщо це можливо. Що стосується пропорційного контролера, для забезпечення стабільного та швидкого керування дозуванням необхідно включити додаткові евристики. Це призводить до того, що контролер з кількома станами має 7 параметрів керування порівняно з 5 параметрами керування для пропорційного регулятора та початкової схеми контролера. Для кожного гвинта потрібно було б знайти та налаштувати параметри керування, але це може виявитися життєздатною схемою керування. З безліччю параметрів, доданих для того, щоб схема керування працювала, потрібно знайти спосіб опустити деякі з параметрів керування або зробити їх автоматичне налаштування, щоб полегшити поширення схеми керування по всій установці. Формула регулятора зворотного зв'язку з кількома станами визначається так:

$$cv_i(k) = K_i \sum_0^k e_i(k) \quad (3.8)$$

$$cv_i(k) \begin{cases} 0 & \text{if } cv_i(k) < 0 \\ cv_i(k) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$cv(k) \begin{cases} cv_p(k) + cv_i(k) & \text{if } \frac{w(k)}{sp} < \text{cutoff} \\ 0 & \text{if } \frac{w(k+5)}{sp} \geq \text{cutoff} \end{cases} \quad (3.10)$$

де,

$cv(k)$ – контрольний вихід, з $cv_p(k)$ і $cv_i(k)$ керуючими сигналами від пропорційної та інтегруючої похідної відповідно;

K_i – коефіцієнт інтегрування для потоку sp ;

$e_i(k)$ - сигнал помилки для швидкості потоку, визначений як різниця між бажаним заданим значенням і фактичною швидкістю потоку матеріалу;

«Cutoff» - це відхилення у % для ваги та заданого значення.

3.4. Функції нелінійного посилення для контролера з кількома станами

Спроба зменшити кількість керуючих змінних і зробити динаміку управління більш сприятливою. Різні функції для посилення можуть використовуватися як для пропорційного контролю ваги, так і для інтегрованого керування витратою.

Використовуючи відхилення від заданого значення в % замість кг для пропорційної частини контролера, початкові контрольні параметри стають незалежними від діапазону бункерів зважування. Відхилення у % потім використовується в гіперболічній тангенсі ($\tanh$) із множенням K_p у функції. Отриманий результат є внеском у швидкість шнека в % від 0 до 100. Рис. 3.2

показує результуючу діаграму контуру керування для даного контролера зворотного зв'язку з кількома станами. Налаштувавши K_p , можна відрегулювати різкість зменшення, з більш квадратичними характеристиками для кривої контролера. Це чудово поєднується зі зниженою швидкістю контролера до кінця, щоб послабити нелінійність у системі дозування.

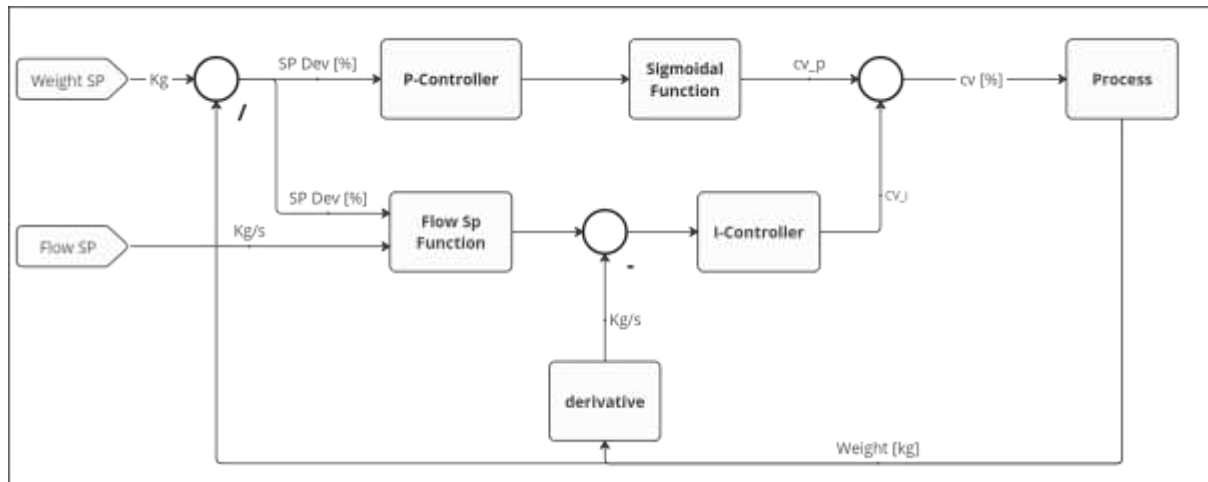


Рисунок 3.2 - Контролер зворотного зв'язку з кількома станами з функціями нелінійного посилення: блок-схема

Наявність заданого значення витрати необхідна для того, щоб контролер дозування завершив партію. При статичному заданому значенні потоку потік повинен знизитися нижче, щоб він сприяв швидкості шнека, оскільки пропорційний контролер забезпечує достатньо високу швидкість шнека для більшої частини циклу дозування. Це можна вирішити, встановивши задане значення витрати, яке змінюється відповідно до відхилення ваги від заданого значення. З експоненціальною функцією для заданого значення потоку константа, як-от e , зводиться до степеня відхилення ваги у відсотках десяткового дробу. Це дасть високу задану точку, яка змусить інтегрований контролер витрати більше сприяти переходу, коли пропорційне керування стає незначним. Ближче до кінця циклу відхилення від заданого значення зменшуватиметься, тоді задане значення потоку, у свою чергу, наблизатиметься до початкового заданого

значення. Коефіцієнт інтегрування K_i потім використовується для визначення того, яка частина відхилення потоку повинна накопичуватися для сигналу керування.

Евристика та міркування

Деякі евристики додаються до схеми контролера для підвищення надійності системи. Вбудований контролер потоку обмежений для активації, коли вага знаходиться в межах 50% від заданого значення. Це гарантує, що інтегрований контролер не стане занадто високим, перш ніж пропорційний контролер ваги зникне. Додатковою евристикою є обмеження контрольного значення до 100%. Логіка контролера зупиняється так само, як і для контролера з кількома станами, з оціночною моделлю, яка використовується для прогнозування, якщо вага досягне точки відсічення в межах заданого горизонту прогнозування.

Дозволяючи контролеру працювати безперервно, кількість параметрів зменшується лише до 3. Значне покращення кількості параметрів, але стає більш абстрактним, що може виявитися важчим для налаштування. Однак абстракція параметрів керування була б тривіальною, якщо б потрібно було оцінити оптимальні параметри керування. У цьому випадку більш безперервна схема керування з меншою кількістю параметрів керування є вигідною. Наявність нелінійних функцій підсилення робить перехід від пропорційного регулятора до регулятора інтегруючої похідної більш плавним, навіть із зменшенням евристик і параметрів керування.

$$cv_p(k) = \tanh\left(\frac{e}{Sp} * K_p\right) \quad (3.11)$$

$$sp_{flow} = sp_{flow_{base}} * \exp\frac{e}{sp} \quad (3.12)$$

$$cv_i(k) = \sum_{k_i}^k \left(1 - \frac{\Delta w}{sp_{flow}}\right) K_i \quad (3.13)$$

$$cv_i(k) \begin{cases} 0 & \text{if } cv_i(k) < 0 \\ cv_i(k) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$cv(k) = cv_p(k) + cv_i(k) \quad (3.15)$$

$$cv(k) \begin{cases} cv_p(k) + cv_i(k) & \text{if } \frac{w(k)}{sp} < \text{cutoff} \\ 0 & \text{if } \frac{w(k+5)}{sp} \geq \text{cutoff} \end{cases} \quad (3.16)$$

де,

$cv(k)$ – контрольний вихід, $cv_p(k)$ і $cv_i(k)$ є керуючими сигналами від пропорційної та інтегруючої похідної відповідно;

K_i - коефіцієнтом інтегрування для потоку sp ;

$ei(k)$ - сигнал помилки для швидкості потоку, визначений як різниця між бажаним заданим значенням і фактичною швидкістю потоку матеріалу;

e - похибка між заданим значенням ваги та вагою;

sp – задане значення ваги;

$spflow$ - задане значення для потоку;

$spflowbase$ - базове задане значення витрати;

«Cutoff» - відхилення у % для ваги та заданого значення.

Автоналаштування

Для зменшення кількості контрольних параметрів для нової схеми контролю може бути достатнім мати набір контрольних параметрів для кожного з бункерів зважування. Однак кожна одиниця дозування дозує різні кількості. Кожен із силосів містить різні матеріали з різними характеристиками, які доставляються за допомогою шнекових конвеєрів, які також мають різні характеристики. Крім того, характеристики шнека та сировини змінюватимуться з часом. Зрозуміло, що кожен із дозуючих блоків

повинен мати індивідуальні параметри контролю для найкращої продуктивності.

Визначивши індекс ефективності, можна використовувати алгоритм оптимізації для пошуку оптимальних параметрів керування для кожного з блоків дозування. Вже створена модель буде використовуватися разом з контролером з кількома станами з функціями нелінійного посилення для розрахунку продуктивності для заданих параметрів контролера.

Індекс ефективності / функція витрат

Створення правильного індексу продуктивності (функції витрат) має вирішальне значення для пошуку найкращих контрольних параметрів для кожного дозувального шнека. Індекс ефективності штрафує інтегральні квадрати помилоку % для заданого значення та зміни регулятора в інтегральному квадраті. Вхід гвинта завжди знаходиться в діапазоні від 0% до 100%, з цієї причини похибки ваги також виражаються в

% на основі кінцевого заданого значення. Це робить співвідношення між двома компонентами індексу продуктивності незалежним від розміру дозування.

Алгоритм оптимізації

Для контролера з кількома станами з функціями нелінійного підсилення є три параметри для налаштування: пропорційний підсилення, задане значення потоку у % від максимального потоку для конкретного дозатора та інтегруючий коефіцієнт підсилення для потоку. З евристикою алгоритму керування та нетрадиційною структурою керування незрозуміло, який оптимальний алгоритм оптимізації. Використання природних алгоритмів для пошуку оптимальних параметрів керування для ПІД-регулятора було створено як рішення проблеми [7, 37, 38]. Але для будівництва знадобляться деякі зусилля. За допомогою python SciPy надає низку методів оптимізації, які можна спробувати. Грубу силу також можна застосувати для пошуку оптимальних параметрів керування. Остаточний

алгоритм оптимізації має обробляти обмеження для параметрів контролера та бути достатньо швидким, щоб його можна було застосовувати в промислових умовах. Тому використовується функція Optimize від Scipy із тестуванням кількох різних алгоритмів оптимізації. Використання SciPy має бути легко налаштовано для вирішення проблеми, а також для визначення її меж.

Межі

Параметри повинні бути обмежені, щоб гарантувати, що оцінені оптимальні параметри керування призведуть до стабільного регулятора. Різні одиниці для меж створюють нерівномірний простір пошуку для алгоритму оптимізації. Це обробляється шляхом нормалізації контрольних параметрів із верхньою та нижньою межею під час нормалізації. Потім параметри повертаються з нормалізації, перш ніж використовувати їх алгоритм керування. Самі межі та початкові значення контрольних параметрів визначаються шляхом випробувань із симуляцією дозування, отримані контрольні параметри застосовуються до моделі дозування. Межі налаштовуються на основі результатів, наданих графіками.

Отримане рішення керування має лише 1 параметр, який оператор може налаштувати. Це баланс між ефективністю та точністю при дозуванні, значне покращення як за кількістю параметрів, так і за тим, наскільки прийнятним є використання окремого параметра.

Параметри контролю:

Таблиця 2.1 - Параметри керування для налаштування

змінна	опис
K_p	Пропорційне посилення
sp_{flow}	Задане значення витрати в % від максимального потоку
K_i	Інтегруючий посилення

Індекс продуктивності:

$$\Delta cv(k) = \begin{cases} cv(k) - cv(k-1) & \text{if } cv(k) < r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$J = \sum_{k=0}^{Np} \left(\left(1 - \frac{e}{sp} \right) 10 \right)^2 Qe + \sum_{k=0}^{Np} \Delta cv(k)^2 Pu \quad (3.18)$$

де,

Q_e - коефіцієнт інтегральних квадратів похибок ваги;

P_u - коефіцієнтом інтегральної квадратичної зміни регулятора;

N_p - горизонт прогнозу для циклу дозування.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Результати аналізу даних

При розробці нової системи управління використовується Python. Як інструмент для виконання аналізу, а також для створення та тестування нових алгоритмів керування. Рис. 3.1 показує діаграму того, як нові компоненти, що використовуються для розробки, включені в існуючі налаштування контролера. Усі об'єкти (двигуни, клапани тощо) на заводі під'єднані до одного ПЛК. Python отримує доступ до них через API для ПЛК, що дозволяє сценарію Python читати та записувати всі теги в ПЛК, надаючи Python доступ до всього заводу.

Використовується файл конфігурації, написаний у форматі JSON. Файл конфігурації містить теги PLC, файл JSON містить структуру, яка відображає сайт і його механічну конфігурацію дозування. Потім файл конфігурації використовується як для аналізу, керування та моделювання. Якщо для керування системою використовується Python, сценарій використовує інформацію тегів із конфігураційного файлу для читання та запису в ПЛК.

Під час аналізу сценарій Python використовує інформацію тегів із конфігураційного файлу для читання значень процесу перед збереженням їх у файлі CSV. Потім файл CSV використовується для аналізу або моделювання системи дозування для подальшого розвитку. Кожен із методів контролю перевіряється в реальному часі на місці з фактичними замовленнями продукції під час виробництва.

Збільшення точності, зменшення аварійних сигналів і зменшення контрольних параметрів використовуються для оцінки результатів, які генеруються. Потім це використовується для визначення того, наскільки застосовні потенційні схеми дозування.

Час відбору проб

Кожен із наведених нижче розроблених сценаріїв Python використовує час вибірки для підтримки певної швидкості читання та запису в ПЛК. Час вибірки також використовується при роботі з дискретизованими даними в оцінці моделі, використанні моделі та обчисленні швидкості зміни ваги. Виходячи з теореми про вибірку Найквіста-Шеннона, вибірка повинна бути принаймні вдвічі швидшою, ніж найшвидший компонент системи [8, 37, 38]. малюнок3.2показує збільшений графік циклу дозування на малюнку1.12з відповідним аналізом Фур'є. Вважається, що коливання, які спостерігаються від 20 до 60 секунд, викликані камерами всередині гвинтового конвеєра, що подає продукт. Це визначається як найшвидша частота системи, яка дає пік близько 2,2 Гц. Дані були зареєстровані з частотою 5 Гц, яка була доведена як достатня для подальшої розробки контролера дозування.

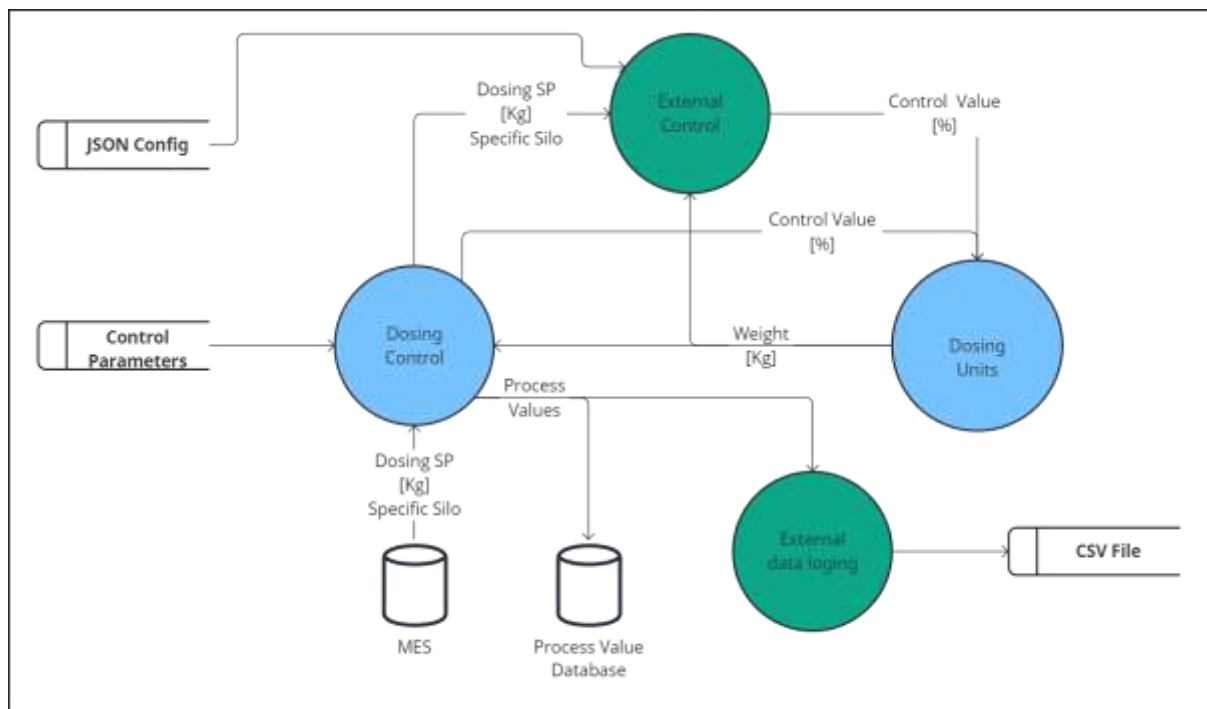


Рисунок 4.1 - Потік даних для нової схеми керування

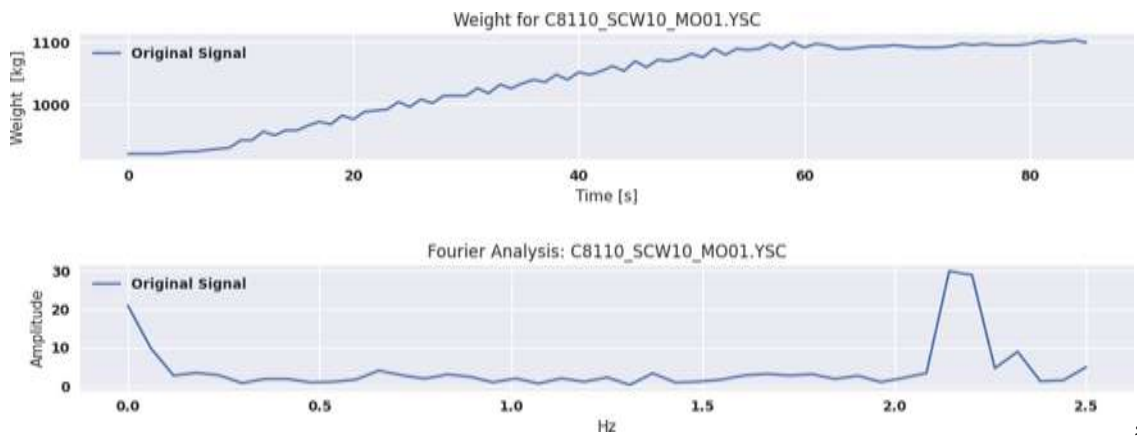


Рисунок 4.2 - Аналіз Фур'є для визначення частоти дискретизації

4.2. Р-контролер

Логіка та евристика Р-контролера переносяться на скрипт Python, який контролює дозування. Файл журналу Python також використовується для запису швидкості та ваги гвинтів у файл CSV. Потім файл CSV використовується для створення графіків, які використовуються для інтерпретації результатів випробування дозування.

Результати трьох різних дозуючих шнеків наведено на Рис. 4.3, 4.4, і 4.5, кожна з яких висвітлює різні недоліки (решта цифр з Р-контролем можна переглянути в додатку). Рисунок 4.3 з дозуванням для шнека 03 показує проблему наявності загальної базової швидкості для всіх шнеків. Коли шнек працює на 15%, до бункера для зважування не транспортується значна кількість, на відміну від шнека 53.5. Це призвело до появи сигналів тривоги через занадто низький потік. У цьому випадку Р-контролер застряг, і дозування довелося миттєво повернути до старої системи, щоб мати змогу доставити остаточну кількість сировини. Як видно з двох стрибків 30% швидкості гвинта в кінці. Рисунок 4.4 разом з рис. 4.5 також показує іншу проблему з Р-контролером. Це час дозування. Коли швидкість шнека зменшується, час, необхідний для дозування кінцевої кількості, надто довгий.



Рисунок 4.3 - Випробування Р-Control для гвинта 3



Рисунок 4.4 - Випробування Р-Control для гвинта 4



Рисунок 4.5 - Випробування Р-Control для гвинта 5

Це може створити вузькі місця, що призведе до погіршення ефективності установки. Рис. 4.4 відрізняється від 4.3 і 4.5 в тому, що дозується менша кількість. Існує коефіцієнт, який зменшує початкову швидкість, коли цільова вага менша. Очевидно, це потрібно налаштувати, щоб зменшити нелінійність системи. З часом дозування лише 6-8 секунд, порушення на шкалі та невідповідності можуть мати надто великий вплив.

P-контролер явно не підходить як остаточне рішення для системи; немає зменшення кількості контрольних параметрів. Єдине помітне покращення в порівнянні з існуючим рішенням було б більш поступове зниження швидкості шнека, яке забезпечує зменшення потенційних нелінійностей системи, але в цьому випадку реалізується за рахунок ефективності системи. P-контролер, ймовірно, можна було б налаштувати так само добре, як і існуюче рішення, але це зруйнувало б одну з причин впровадження нового контролера, оскільки немає чіткого зменшення (якщо не збільшення) кількості використовуваних параметрів. Кожен із гвинтів потребує постійного налаштування, щоб відповідати змінам дозувального обладнання та сировини.

4.3. Оцінка моделі

У розробці моделі використовується той самий сценарій журналювання Python, який використовується для створення файлів CSV для результатів P-Controller. Дані з файлу CSV завантажуються в Python і змінюються. Залежний набір даних (Y) створюється з різницею ваги для кількох циклів дозування. Незалежні дані витягуються з відповідних швидкостей шнека. Початкова модельна оцінка виконується на кількох партіях дозування матеріалу. Це призводить до погіршення прилягання для кожного гвинта, але гарантує, що структура моделі є достатньо загальною, щоб уникнути

надмірної конструкції моделі після того, як модель буде застосовано до конкретних дозуючих одиниць.

Параметри моделі визначаються шляхом виконання звичайного методу найменших квадратів для набору даних, який потім оцінюється за допомогою R-квадрату. R-квадрат – це статистичний показник, який показує, яка частина дисперсії у зміні ваги пояснюється незалежними змінними. R-квадрат використовується замість середньоквадратичної помилки (RMSE) через одиниці. Перевірка моделі виконується на кількох гвинтах, кожна з яких має різні вагові діапазони. RMSE зберігає одиниці в розрахунку, тому його було б неправильно використовувати в цьому випадку під час порівняння результатів для конкретних циклів гвинтів.

Оскільки різниця у вазі є значно шумною, краще візуалізувати підгонку моделі можна, натомість побудувавши вагу в часі, як показано на рис. 4.6. Графік складається шляхом накопичення різниці ваги за кожний часовий крок. Коли новий гвинт починає дозувати, накопичене значення скидається.

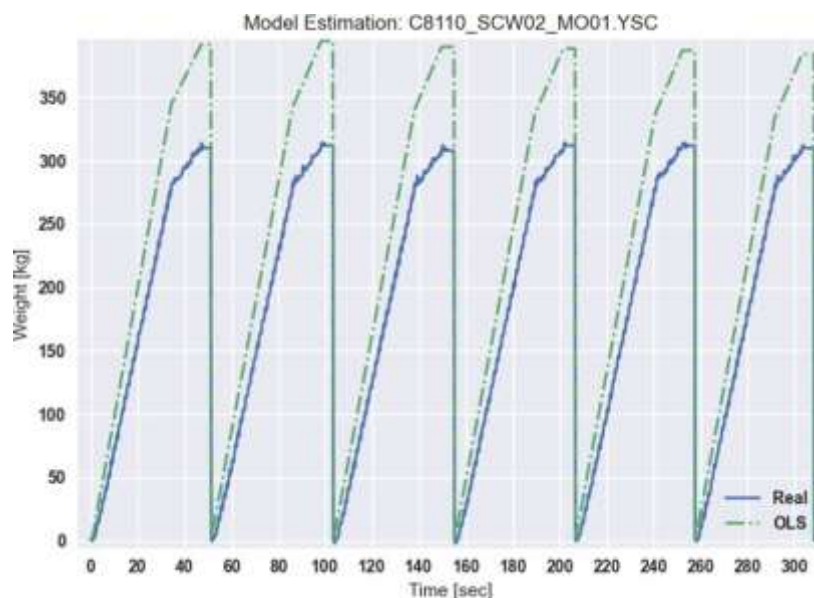


Рисунок 4.6 - Перевірка OLS для гвинта 2

Знаючи, що існують затримки в транспортуванні сировини через камери гвинтового конвеєра, додаються запізнілі входи. Результати якого можна побачити в табл. 3.2. При збільшенні лагованих змінних показник R-квадрат стає поступово кращим. Ідеальним вибрано відставання в 6 часових кроків. Після 6 часових кроків відставання покращення показника R-квадрат збільшується лише незначно. Ще одна причина не включати будь-які подальші затримки полягає в тому, щоб не збільшити ризик переобладнання моделі після того, як її буде застосовано до кожного конкретного гвинта.

Таблиця 4.1 - Результати OLS

	R-квадрат
Lag-0	0,438
Lag-1	0,438
Lag-2	0,457
Lag-3	0,465
Lag-4	0,472
Lag-6	0,477
Lag-8	0,479
Lag-10	0,480

Таблиця 4.2 - Результати OLS для конкретних гвинтів

	Середнє R-квадрат
Lag-6	0,472
Lag -6- f1	0,486
Lag -6- f2	0,486
Lag -6- f1-2	0,486

Нелінійні керуючі входи

Дивлячись на гвинт 3 на рис. 4.3, очевидно, що існують тонкі нелінійності, які модель з лінійним зв'язком між швидкістю та зміною ваги не може вловити. Під час пропорційних контрольних випробувань різниця у

вазі припинилася, коли швидкість шнека досягла приблизно 10%. Це також можна побачити, дивлячись на OLS для 6 керуючих входів із відставанням для гвинта 10 на рис. 4.6 (Решту єдиних перевірок OLS можна переглянути в додатку). Значне перевищення ваги, здається, викликане тим фактом що модель намагається знайти компроміс між двома швидкостями керування, які впливають на різницю ваги.

Ці нелінійності необхідно врахувати, щоб мати можливість пояснити більшу частину дисперсії в залежних змінних. Це робиться шляхом додавання експоненціальних версій вхідних даних гвинта до вхідних даних моделі. Експоненти $f_1 = cv^{3/2}$ і $f_2 = cv^{1/2}$ додаються. Результати додавання цих контрольних входів можна побачити в табл. 4.1.

Оцінка R-квадрат значно краща, якщо додати один із нелінійних членів окремо. Для забезпечення більшої кількості даних безперервного керування новим контролером обидва нелінійні вхідні члени зберігаються для остаточної моделі.

Оцінка в реальному часі за допомогою ковзного вікна випробовується з остаточною моделлю як з нелінійними термінами, так і з затримкою в 6 часових кроків. Результати показані для гвинтів 7 і 17 на рис. 4.7. При уважному розгляді стає зрозуміло, що модель переобладнана і в кінцевому підсумку містить коливання, спричинені камерами шнекового конвеєра. Це потрібно виправити, щоб можна було використовувати оцінку потоку. малюнок 3.8 показує ту саму структуру моделі зі зменшеним лагом лише на 2 часові кроки. Однак це не враховує початкову затримку в транспортуванні сировини. Використання моделі в розробці контролера покаже, чи достатньо вона охоплює характеристики системи.

Остаточна модель має затримку в 2 часові кроки для керуючого входу з двома додатковими нелінійними гвинтовими входами, доданими до системи.

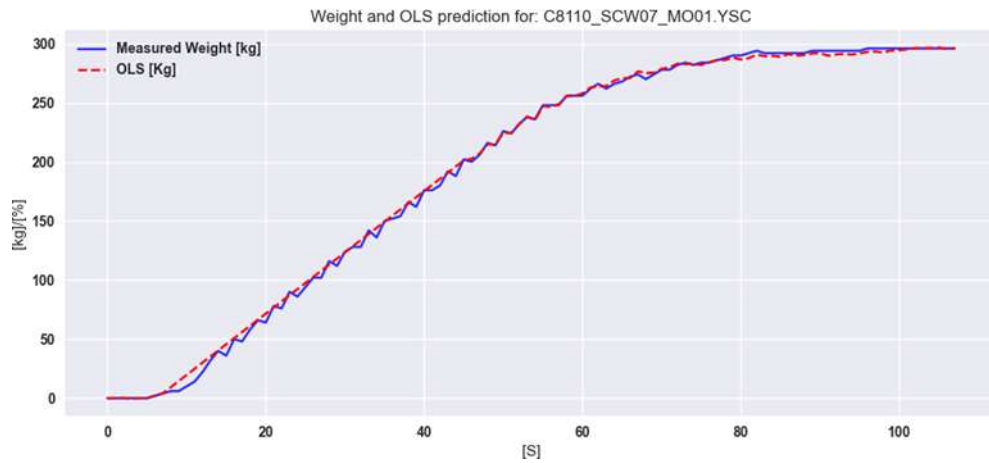


Рисунок 4.7 - OLS для гвинта 7

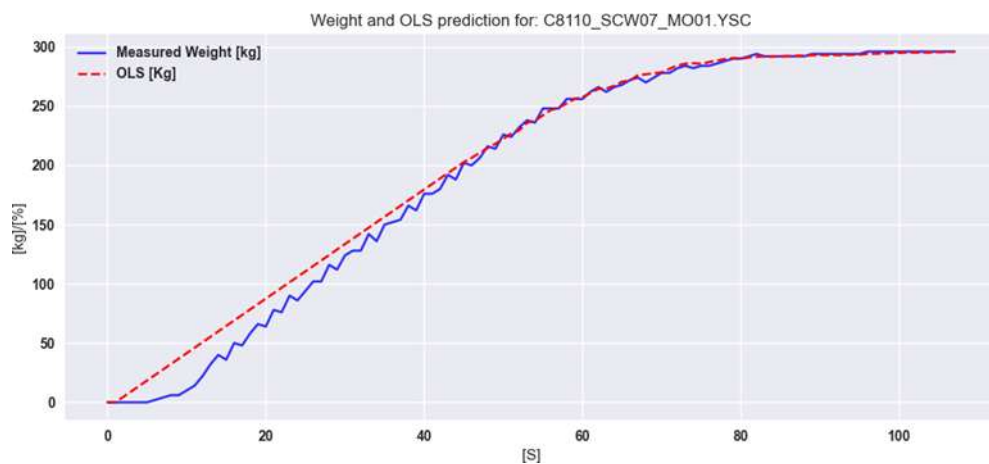


Рисунок 4.8 - OLS для гвинта 07 зі зменшеною затримкою

Числові значення для параметрів моделі можна переглянути у конфігураційному файлі в додатку з масивом під назвою theta для кожної моделі.

Остаточна модель дозування наведена нижче:

$$\Delta y(k+1) = b_1 u_1(k) + b_2 u_2(k) + b_3 u_3(k) + b_4 u_1(k-1) + b_5 u_2(k-1) + b_6 u_3(k-1)$$

де,

$$u_1 = cv(k), u_2 = f_1(ck(k)), u_3 = f_2(cv(k));$$

$x(k)$ вектор стану,

$$x(k) = \begin{bmatrix} w(k) \\ \Delta w(k) \end{bmatrix};$$

$u(k)$ - вхідний вектор керування,

$$\mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \\ u_1(k-1) \\ u_2(k-1) \\ u_3(k-1) \end{bmatrix};$$

Це перетворюється на такі компоненти моделі простору станів:

A - матриця стану,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

B - вхідна матриця,

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \end{bmatrix}$$

C - вихідна матриця,

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Важко сказати, чи успішна стратегія оцінки моделі. Різні випадки використання моделі висуватимуть різні вимоги до точності моделі. Результати від конкретного гвинта на малюнку 3.6 виглядають бідними. Але з цифрою, яка показує накопичену різницю у вазі, помилка прогнозу теж буде. Здається, що модель достатньо точна для фільтра Калмана, де накопичення прогнозованої помилки не відбуватиметься через включення вимірювань живої ваги в оцінений стан. Уважно дивлячись на різницю між прогнозом і вимірюванням у загальній перевірці OLS, перевищення та збурення не

включені в оцінку моделі, що є хорошим провісником для фільтра на основі моделі, такого як фільтр Калмана. Використання моделі для оцінки оптимальних параметрів керування вимагало б більш високої точності моделі.

Фільтр

Якщо буде використовуватися контролер на основі похідної, потрібна стабільна похідна. Рис. 4.9 показує дискретну похідну ваги для всієї партії разом з його відповідним аналізом Фур'є. Зрозуміло, що вихідна різниця ваги надто шумна, щоб використовувати її в будь-якому контролі.

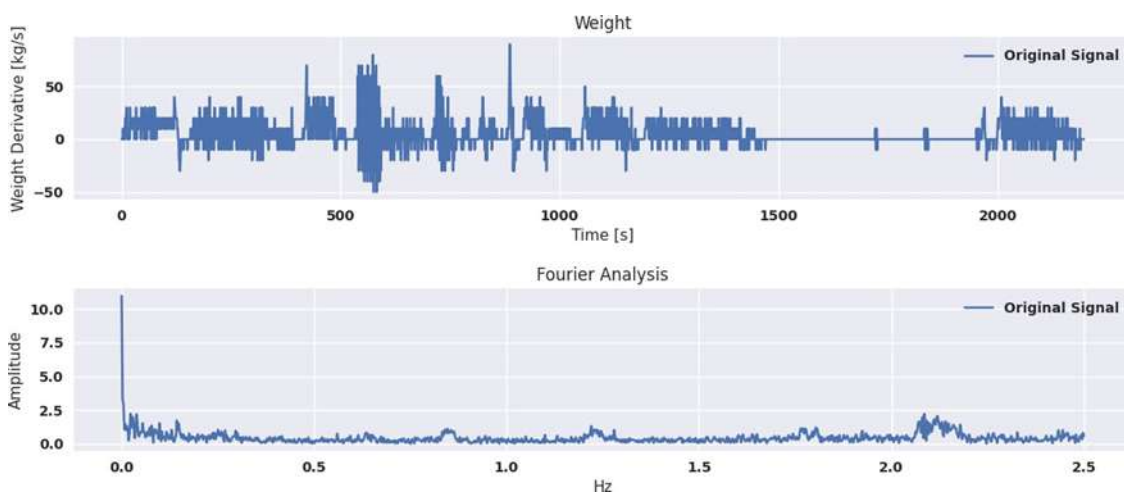


Рисунок 4.9 - Аналіз Фур'є даних дозування

Фільтр низьких частот

Для розробки фільтра низьких частот використовуються ті самі дані CSV, які використовуються для розробки моделі. Створено сценарій Python, який виконує аналіз даних Фур'є, який потім наноситься на графік разом із різницею ваги. З цього можна зробити висновок про результати фільтра.

Граничну частоту можна визначити емпірично, дивлячись на попередні цикли дозування. Ми хочемо зберегти зміну похідної, викликану гвинтовим входом. Це можна знайти, подивившись на тривалість, необхідну для того, щоб похідна ваги стала постійною за умови постійної швидкості гвинта. Ця тривалість потім переноситься на певну частоту. Дозування займає

приблизно 1-5 секунд, щоб похідна ваги стала постійною, даючи частоту від 1 Гц до 0,2 Гц для частотної характеристики. Отже, частота зрізу визначається рівною 0,5 Гц, яка застосовується до фільтра низьких частот 3-го порядку. Результати фільтра низьких частот можна побачити на малюнку 3.10. Похідна помітно згладжується, а перетворення Фур'є показує, що вищі частоти підлягають фільтрації. Фільтр низьких частот перевіряється шляхом його застосування до частини даних дозування, як показано на рис. 4.11, і він показує набагато більш плавну зміну ваги, але з помітним відставанням порівняно з фактичною вагою.

Рис. 4.12 і 4.13 показує відфільтровану похідну ваги від мікроваги дозування, коли вона зазнає збоїв. У цих випадках використання похідної частини може створити проблеми для системи дозування. LPF не в змозі впоратися з перешкодами такого характеру. Рішенням може бути зменшення граничної частоти, але це призведе до ще більшого відставання відфільтрованих значень. У деяких випадках порушення самі по собі досить проблематичні, впливаючи на якість продукції та підкреслюючи важливість встановлення фільтра.

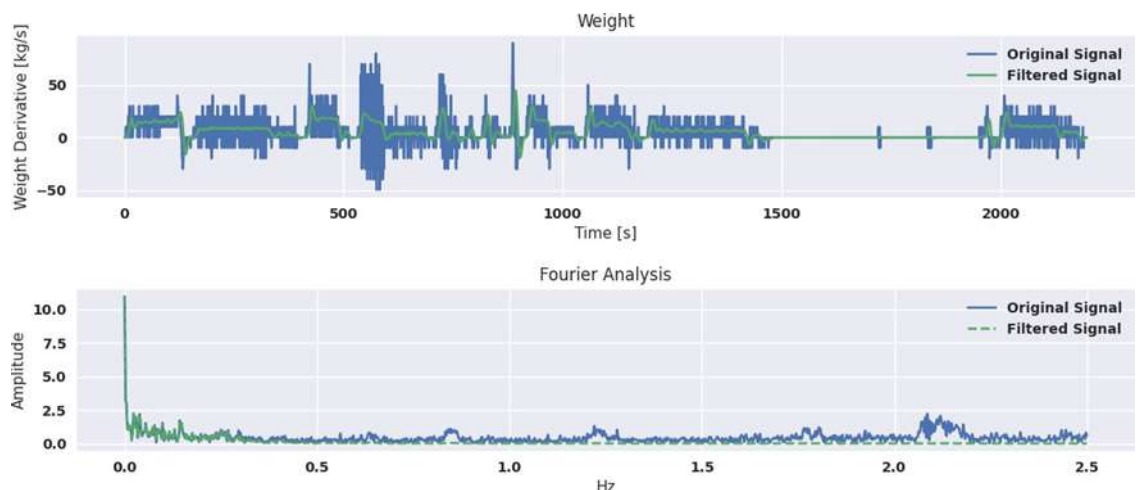


Рисунок 4.10 - Аналіз Фур'є відфільтрованих даних дозування

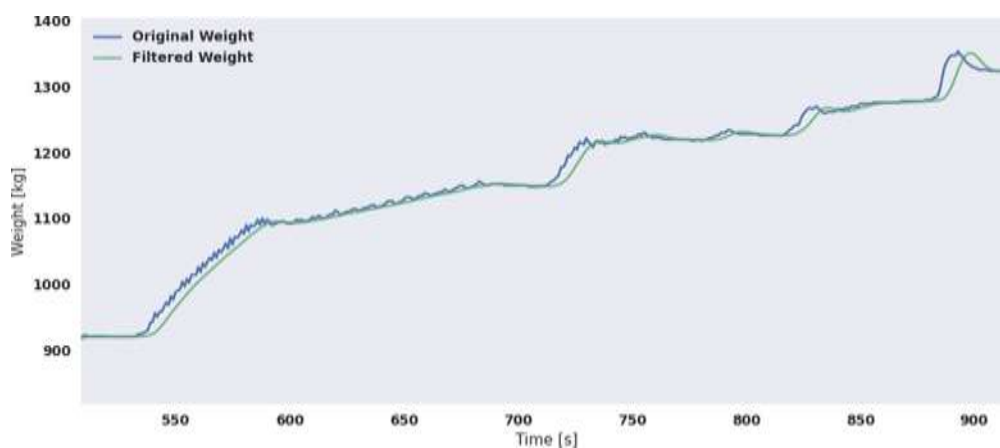


Рисунок 4.11 - Застосований фільтр низьких частот

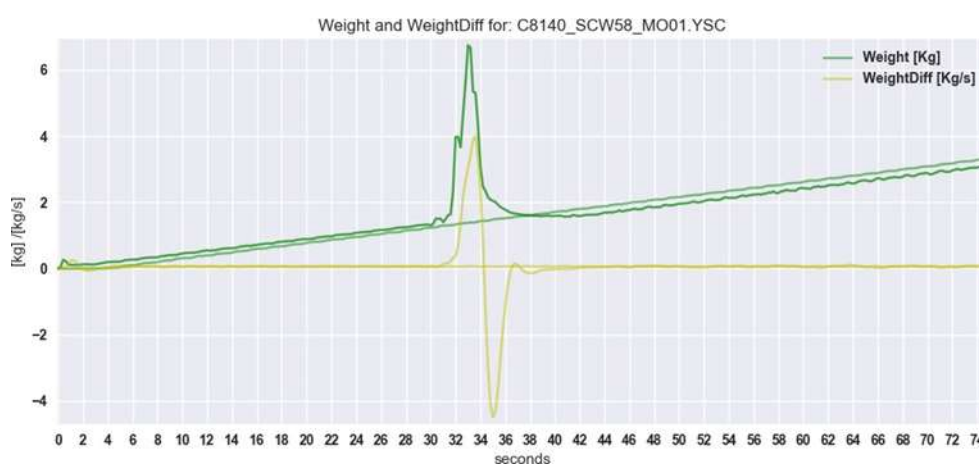


Рисунок 4.12 - Відфільтрована похідна ваги для гвинта 58



Рисунок 4.13 - Відфільтрована похідна ваги для гвинта 62

Фільтр Калмана

Під час побудови фільтра для прогнозування використовується вже встановлена модель простору станів, а вага з контейнерів зважування використовується як вимірювання як для самої ваги, так і для побудови вимірної похідної ваги. Це об'єднано в сценарій Python із бібліотекою Python, що забезпечує алгоритм фільтра Калмана [9, 38]. Щоб фільтр працював належним чином, необхідно знайти відповідні дисперсії похибок вимірювання та моделі з відповідними коваріаціями. З різним зважуванням бункерів, які мають різний рівень шуму, кожен з них потребує окремого вимірювання коваріаційна матриця шуму.

Фільтр Калмана передбачає, що шум є білим, а матриці коваріації шуму представляють розподіл Гауса. Шум – це не головна проблема, яка спричиняє виробничі проблеми, а збої в системі. Перешкоди походять від зовнішнього обладнання, викликаючи коливання або зміни тиску.

На основі методів ініціалізуються коваріаційні матриці. Виходячи з цього, шум вимірювання та коваріаційні матриці шуму процесу налаштовуються вручну за допомогою проб і помилок. Остаточні відхилення можна побачити в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 - Відхилення для фільтра Калмана

	W_w	$B_{\Delta w}$	B_{cow}	V_w	$B_{\Delta w}$	B_{cow}
Первинний контейнер для зважування	9	1	0,01	4	1	1
Бункер для зважування 1 мікро	4	1	0,005	0,002	10^{-5}	0,001
Бункер для зважування 2 мікро	2	1	0,01	0,02	10^{-4}	0,001

Результати фільтра Калмана можна побачити на рис 4.14 і 4.15. На рис. 4.14, фільтр значно гладкіший і добре працює, фільтруючи коливання,

викликані камерами матеріалу, що подається через шнек. Дивлячись на гвинт 66 на рис. 4.15 приблизно протягом 150 секунд виникають значні збурення, які фільтр Калмана здатний значно послабити. Фільтр Калмана працює за призначенням, але не вирішує механічну проблему, яка є джерелом проблеми. Знайти першопричину завжди краще. Проте фільтр Калмана виявився рішенням, яке могло б усунути низку екзогенних збурень.

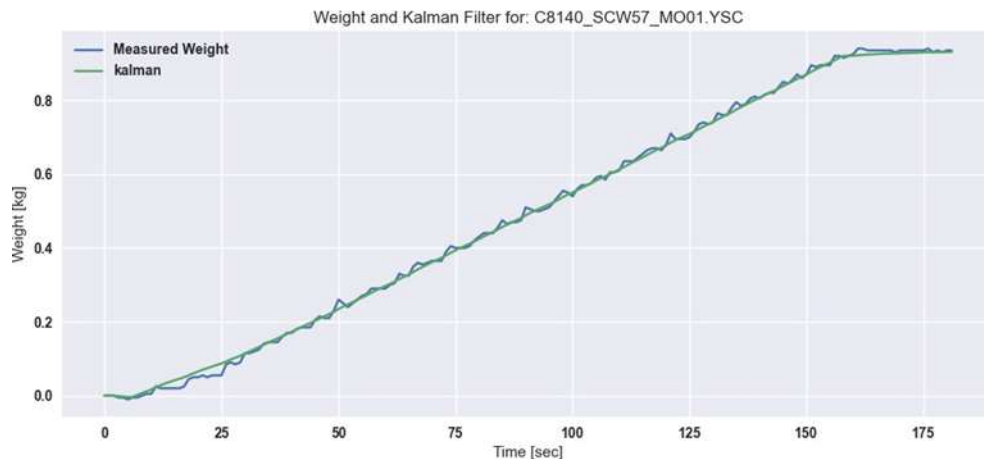


Рисунок 4.14 - Фільтр Калмана для гвинта 57

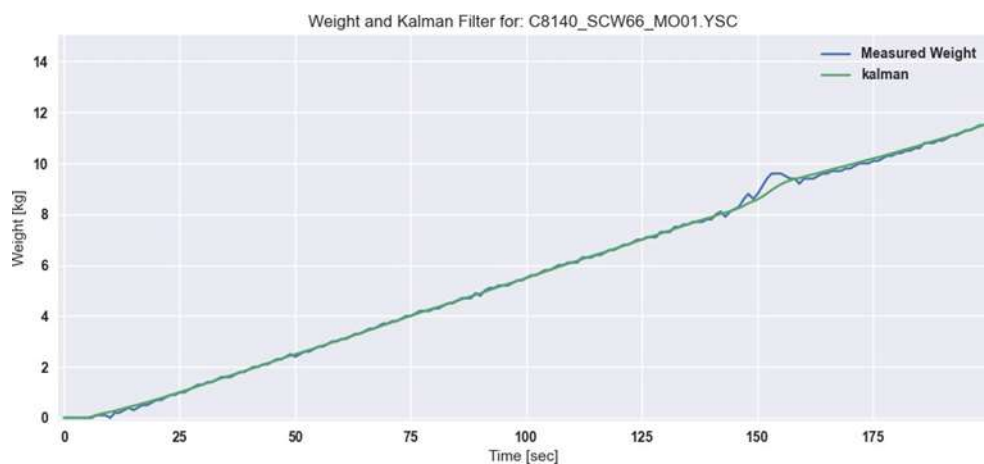


Рисунок 4.15 - Фільтр Калмана для гвинта 66

Багато становий контролер

Використовується така ж процедура, як і для Р-контролера. Логіка та евристика контролера кількох станів переносяться на сценарій Python. Для реєстрації результатів використовується додатковий сценарій Python. Вже встановлений фільтр Калмана використовується для більш гладкого вагового

стану і для похідної ваги. Результати Multi State-Controller показані на рис. 4.16 і 4.17. Рисунок 4.16 з дозуванням за допомогою гвинта 9 показує багатообіцяючі результати. У межах заданого обмеження контролер запускається і поступово знижується до нуля, досягаючи заданого значення. Контролер гвинта 9 явно працює за призначенням. малюнок 3.17 показано дозування за допомогою шнека 10. Порівнюючи це з шнеком 9, стає зрозуміло, які проблеми створюють відмінності в характеристиках сировини та дозуючому обладнанні. Задане значення дозування відхиляється лише приблизно на 15% між гвинтами 9 і 10, тоді як гвинт 10 дозує майже вдвічі більше часу. Значна різниця в потоці матеріалу між дозуючими шнеками при використанні однакових параметрів Multi State-Control не працює в цьому випадку. Коли наближається до заданого значення, швидкість потоку для гвинта 10 стає занадто низькою. Існує додаткова затримка в швидкості зміни дозування матеріалу, через що інтегрована частина контролера потоку надто різко підвищується в кінці циклу дозування. Результатом цього збільшення є перевищення, яке змушує контролер дозувати занадто багато.

Підтримуючи мінімальну швидкість потоку за допомогою інтеграції зворотного зв'язку з заданим значенням потоку, вирішується проблема припинення потоку матеріалу, коли вага стає занадто близькою до заданого значення. Щоб це працювало належним чином, потрібне знання максимальної/мінальної швидкості потоку системи дозування, або її можна відрегулювати методом проб і помилок. Проблема дозування триває занадто довго. В ідеалі контролер повинен мати вищу швидкість дозування протягом довшого періоду з наступним різкішим зниженням до заданого значення. Це можна було б регулювати за допомогою параметрів, встановлених за допомогою евристичної логіки, причому ступінь успіху залежав би від заданого значення та поточного стану сировини.



Рисунок 4.16 - Multi State-Control для гвинта 9



Рисунок 4.17 - Multi State-Control для гвинта 10

5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1. Налаштування контролера на основі індексу продуктивності

Для пошуку оптимальних параметрів керування розроблено скрипт Python. Вже створена схема оцінки моделі та схема контролера реалізовані в скрипті Python. Обидва вони необхідні для створення індексу ефективності для заданого набору контрольних параметрів. Індекс продуктивності штрафує відхилення від заданого значення, а також зміни, внесені до керуючого входу. При розрахунку компонентів індексу продуктивності модель моделюється разом із заданою схемою регулятора. А

Алгоритм мінімізації, наданий SciPy, бібліотекою Python, використовується для пошуку оптимальних параметрів керування для даної розрахункової моделі.

Випробовуються різні алгоритми оптимізації для пошуку алгоритму, який найбільше підходить для контролера зворотного зв'язку з кількома станами та нелінійними функціями посилення. Евристика контролера генерує негладкий простір пошуку для алгоритму оптимізації, що ускладнює пошук мінімуму для алгоритмів рядкового пошуку. Найперспективнішим вважається метод пошуку регіону довіри. Як наближення квадратичного представлення продуктивності, індексованої в межах меншого регіону.

Для алгоритму оптимізації є три незалежні змінні: пропорційний коефіцієнт посилення, задане значення потоку в % від максимального потоку для конкретного блоку дозування та інтегральний коефіцієнт посилення для потоку. Максимальна швидкість потоку для конкретного дозувального блоку визначається за допомогою 100% гвинтового входу через модель протягом заданого періоду з відставанням. Щоб скоротити час виконання та зробити оптимізацію застосовною для всіх моделей дозування, встановлення

відповідних меж для незалежних змінних має вирішальне значення. Параметри керування, знайдені алгоритмом оптимізації, використовуються в моделюванні з тією ж моделлю, це показує, що посилення до 20 необхідне для найповільніших дозуючих пристроїв, щоб підтримувати достатньо різке зниження вхідного сигналу контролера до кінця. Для заданого значення витрати використовується діапазон від 30% до 100% від максимальної витрати. Поточна схема дозування використовує 100% швидкість шнека більшу частину часу для загального дозування та 30% для точного дозування, отже, діапазон від 30% до 100%. Остаточну незалежну змінну, інтегральний коефіцієнт посилення для потоку, потрібно вибирати ретельно, щоб не внести нестабільності в нову схему контролера. Інтегральна дія базується на відхиленні в десяткових % для потоку, а інтегруючий вхід також у %, що відображається безпосередньо на гвинтовому вході. Встановивши бажане обмеження швидкості зміни швидкості шнека близько 2 % і не менше 0,5 % , межі для інтегрального підсилення стає від 0,005 до 0,02. Остаточний огляд встановлених меж наведено в табл. 5.1.

Параметри контролю:

Таблиця 5.1 - Межі для параметрів

Змінна	Опис	Верхня межа	Нижня межа	Початкове значення
K_p	Пропорційне посилення	0	20	10
sp_{flow}	Задане значення витрати в % від максимального потоку	30%	100%	65%
K_i	Інтегруючий посилення	0,005	0,02	0,0125

Рис. 5.1 і 5.2 показують результати змодельованого циклу на основі того самого дозування одиничної моделі із співвідношенням 1 і 1/100 відповідно проти відхилення стану та контролю зміна вхідних даних для

індексу продуктивності. Оптимізація працює за призначенням. Базуючись на апріорних даних дозування, які будують модель, існує лише один параметр, який має бути налаштованим, що є співвідношенням між відхиленням стану та зміною вхідного сигналу керування. Єдина змінна коефіцієнта продуктивності повинна працювати для одного вагового бункера, що містить усі дозувальні шнеки. Але маючи одну змінну коефіцієнта продуктивності для кожного дозувального блоку, можна налаштувати точність відповідно до швидкості для кожного з них. Це було б бажано з різними силосами, що містять сировину різної вартості. На основі рис. 5.1 і 5.2, метод використання індексу продуктивності, який потрібно мінімізувати, щоб знайти оптимальні параметри керування, виглядає життєздатним. Однак увесь метод передбачає оціночну модель, яка включає найважливішу динаміку системи.

Нелінійна зважена помилка для керування зворотним зв'язком

Базуючись на вже створеному контролері з кількома станами, нелінійні зважені помилки використовуються для зворотного зв'язку контролера з кількома станами, щоб отримати більш бажану динаміку системи. Використання сигмоїдальної зваженої функції похибки використовується для пропорційного регулятора, тоді як експоненціальна зважена функція використовується для інтегруючої частини для заданого значення витрати.

Сценарій python Multi State-controller оновлено цими функціями разом із деякими додатковими евристичними. При розробці налаштування контролера на основі індексу продуктивності для спрощення використовується функція моделювання замість запуску контролера в реальному часі на заводі.

Метою використання нелінійних зважених похибок є створення більш бажаної динаміки регулятора та зменшення кількості параметрів, що використовуються в схемі регулятора. Більш бажана динаміка системи включає в себе можливість працювати шнековим входом на 100% протягом більш тривалого часу, зберігаючи плавне зниження до кінця циклу

дозування. Це забезпечує швидший час дозування, зберігаючи стабільну роботу контролера. У той же час слід підтримувати мінімальну швидкість потоку, щоб контролер не давав надто низький вхідний сигнал, через що цикл дозування не міг завершитися або тривав занадто довго.

Результати можна побачити за допомогою моделювання на рис. 5.1 і 5.2, а також у тестуванні реального дозування з правильно налаштованими контрольними параметрами на рис. 5.3. Порівняно з циклами дозування на рис. 4.17 і 4.16, гвинтовий вхід підтримує вищий відсоток протягом більш тривалого часу. Перехід від повної швидкості гвинта до початку її зменшення також є набагато плавнішим.

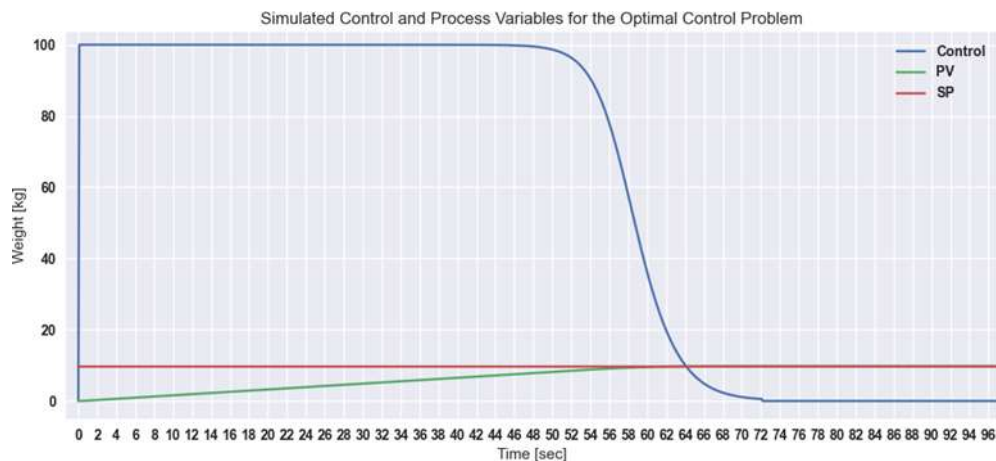


Рисунок 5.1 - Змодельоване оптимальне швидке керування з нелінійним зваженим зворотним зв'язком

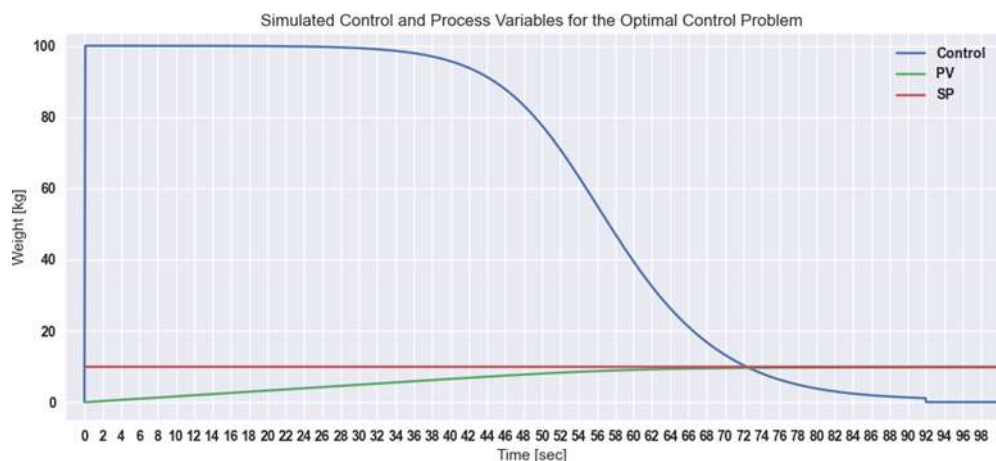


Рисунок 5.2 - Змодельоване оптимальне повільне керування з нелінійним зваженим зворотним зв'язком

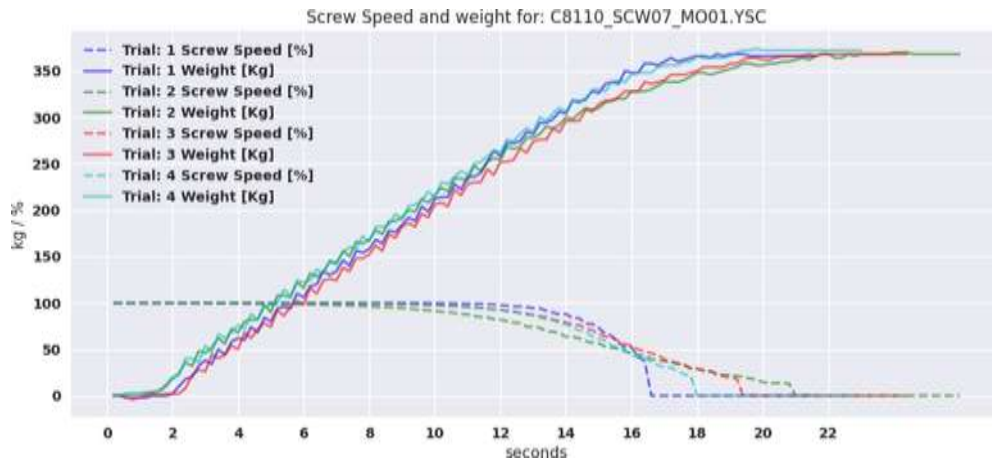


Рисунок 5.3 - Повністю зібране рішення перевірено на гвинті 7

Початкова схема Multi State-Controller, ймовірно, могла бути налаштована відповідно до бажаної динаміки контролера, але це вимагало б додаткового налаштування параметрів контролера.

Для початкового контролера з кількома станами є 5 параметрів, які потрібно налаштувати, тоді як для нелінійного зваженого контролера зі зворотним зв'язком помилок є лише 3 параметри. Це стало можливим завдяки тому, що для досягнення тих самих властивостей контролера потрібно менше евристик. Це повинно полегшити налаштування та значно пришвидшити алгоритм мінімізації для пошуку оптимальних параметрів.

4.5. Повністю зібрана схема управління

Для остаточної схеми контролера все об'єднано в єдину програму Python, а остаточний код включений у додаток разом із відповідним конфігураційним файлом. Оцінка моделі, фільтрація Калмана, нелінійне зважене керування кількома станами та оптимальна оцінка параметрів. Кожна з цих функцій міститься в класі в одному сценарії Python. Потім для створення екземплярів класів використовується другий сценарій python. З одним екземпляром для кожного з блоків дозування. Це надає кожному

дозуючому блоку унікальну розрахункову модель, який використовується фільтром Калмана та оцінкою оптимального керування. Програма Python структурована з багатопотоковістю, з єдиним потоком, що обробляє зв'язок ПЛК, і одна нитка для кожного з вагових бункерів на заводі.

Запускаючи повністю зібрану схему контролера, оцінені параметри моделі повинні сходитися до оптимальної оцінки. Параметри конвергентної моделі повинні забезпечувати адекватне представлення системи. Тоді фільтр Калмана та оцінка оптимального контролю повинні працювати без будь-яких ручних налаштувань для кожного дозувального блоку. З єдиним параметром, доступним для налаштування, є точність/швидкість дозування. Програма працює у фоновому режимі, початкова схема контролера працює як зазвичай. Це дає нову схему контролера можливість збирати дані для початкової оцінки моделі.

З початковою моделлю на місці новий контролер тестується в реальному часі, результати видно на рис. 5.3 і 5.4 від гвинта 7 і 18 відповідно. Решта результатів включено в додаток. Гвинт 7 показує дозування, початкова оцінка моделі призводить до дозування, яке зменшується занадто різко. Для наступних циклів дозування включаються минулі дані дозування, що призводить до циклу дозування, який, здавалося б, наближається до оптимального рішення. Гвинт 18 дюймів на рис. 4.21 не забезпечує такої ж конвергенції для оптимального керування, як для гвинта 7. Це може бути пов'язано з короткою тривалістю дозування, яка забезпечує обмежену кількість даних для оцінки моделі. Для кожного з циклів дозування швидкість шнека змінюється плавно, чого не можна сказати про швидкість шнека в 4.3, 4.4, і 4.5 для початкового контролера кількох станів випробування, яке проводилося без використання фільтра Калмана. Зрозуміло, що фільтр Калмана дає переваги при використанні разом із новою схемою контролера, це також чітко видно на рис. 5.5, де показано останнє випробування гвинта 7.

Щоб модель використовувалася належним чином, програма дозування повинна відповідати вказаному часу роботи 5 Гц (200 мс). Це перевіряється шляхом реєстрації тривалості роботи потоку даних, а також потоку контролера. Результати можна побачити на рис. 5.6 і 5.7 відповідно. Зрозуміло, що поточна реалізація python підтримує послідовну тривалість виконання для обох потоків.



Рисунок 5.4 - Повністю зібране рішення перевірено на гвинті 18



Рисунок 5.5 - Повністю зібране рішення. Фільтр Калмана перевірено на гвинті 7

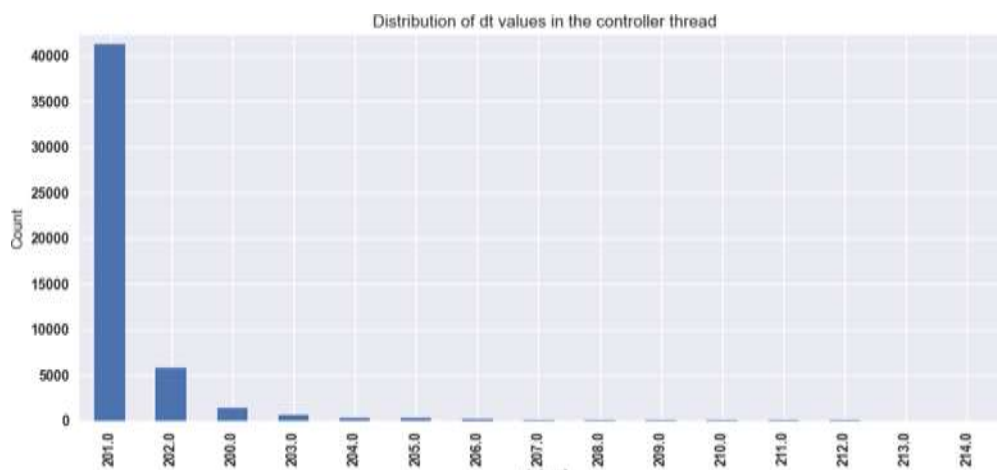


Рисунок 5.6 - Розподіл часу вибірки для потоку контролера

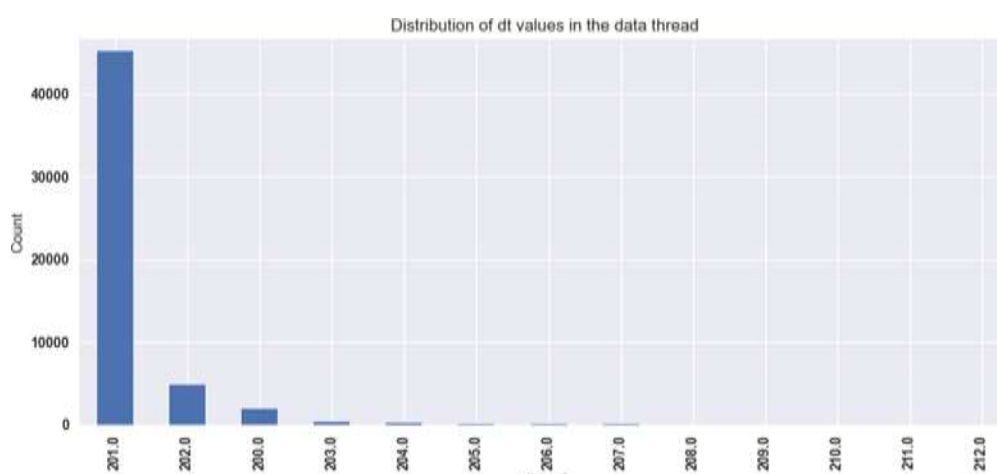


Рисунок 5.7 - Розподіл часу вибірки для потоку даних

Успішність схеми контролера можна визначити за трьома ключовими показниками ефективності: частотою аварійних сигналів, точністю дозування та кількістю контрольних параметрів. Остаточна схема контролера була випробувана на 7 партіях дозування сировини, що ускладнює якісні висновки щодо точності вимірювання, а також щодо кількості сигналів тривоги. Тим не менш, остаточна схема контролера розглядає кожну з цих проблем, і ряд неявних висновків можна зробити, щоб визначити успіх остаточного рішення.

Остаточне рішення для контролера побудовано на Python і містить оцінювач живої моделі, фільтр Калмана, нелінійний зважений контролер зі зворотним зв'язком помилки, а також процедуру оцінки оптимального

параметра керування. Розрахована модель служить основою як для фільтра Калмана, так і для оцінки оптимального параметра керування, що робить її слабким місцем усього рішення. Без достатньо точної моделі контролер не працює. З точною моделлю фільтр Калмана здатний фільтрувати коливання та збурення, і можна знайти оптимальні параметри керування. Завдяки мінімізації функції витрат, яка штрафує небажану поведінку контролера, кількість параметрів, які необхідно налаштувати для кожного дозувального блоку, зменшується з 5 до 1 для кожного дозувального блоку. Це зменшує кількість параметрів приблизно з 200 до 37 для всіх блоків дозування на заводі. Єдиний параметр, який залишився, використовується для балансування вартості ваги, що відхиляється від заданого значення, і змін, внесених до вхідних даних контролера. Параметр автонастроювання використовується для визначення важливості точності дозування, що має забезпечити більш точне дозування там, де це бажано.

Під час перегляду остаточного рішення з BioMag стало зрозуміло, що схема контролера має варіанти використання, окрім дозування сировини. З використанням регулятора витрати схема контролера може бути використана для керування дозуванням масла, а також керування парою. Схема контролера може виявитися особливо корисною для дозування масла, де потрібна певна швидкість потоку, щоб отримати рівномірний розподіл на гранулах.

Контролер дозування реалізований на Python. Для взаємодії з ПЛК заводу використовується API Python. Працюючи зі швидкістю 200 мс, скрипту Python вдається досить швидко реагувати та контролювати дозування. Однак використання Python для керування промисловим процесом є нетрадиційним, оскільки воно вводить додаткові точки зупинки в процесі. Вкрай важливо мінімізувати ці точки зупинки, щоб підтримувати максимально можливий час безвідмовної роботи. Комп'ютер, на якому розміщено сценарій Python, може вимкнутися, перезапуститися або вийти з

ладу. Зв'язок між сценарієм Python і ПЛК також підлягає ретельному розгляду, оскільки він використовує загальнодоступний API через спеціальну бібліотеку Python, яка не підтримується великим промисловим постачальником. Крім того, використання мови Python збільшує ризик невдачі. Оскільки Python є дуже динамічною мовою, ймовірність збою коду зростає. Поряд з розглядом надійності реалізованого рішення, існує також проблема оптимізації часу обчислення. малюнок 4.1 показує час затримки старту з 0 секунд для 4 партій дозування для шнека 7. Затримка викликана обчисленням оптимальної оцінки параметра керування. За допомогою алгоритму, що працює перед кожним із циклів дозування, враховуючи поточну розрахункову модель, а також задане значення ваги.

Реструктуризація коду має усунути затримку обчислень. Маючи окремий потік для вирішення задачі оптимізації для кожного бункера зважування, потік контролера може працювати самостійно, тоді як алгоритм оптимізації оцінює оптимальні параметри керування для наступного силосу. Маючи це на місці, можна також зробити ще один крок у захисті коду та перенести контролер у програму С або в саму програму ПЛК. Переміщення потоку контролера в ПЛК створить більш надійне рішення, не покладаючись на зовнішню програму для роботи. Програма Python все одно буде потрібна для запуску алгоритму оптимізації для оптимального керування. Розділ таким чином зменшить залежність від стабільного шляху зв'язку, а також матиме постійну доступність програми Python.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Вимоги охорони праці під час роботи з електроустаткуванням

Загальні положення

Інструкція з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування розроблена відповідно до Закону України «Про охорону праці» (Постанова ВР України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ) в редакції від 20.01.2018 р, на основі «Положення про розробку інструкцій з охорони праці», затвердженого Наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 29 січня 1998 року № 9 в редакції від 01 вересня 2017 року, з урахуванням «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів», затвердженими наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 р. № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 13.02.2012 р. №91, «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів», затверджених наказом Держнаглядохоронпраці України 09.01.1998 р. № 4.

Всі положення даної інструкції з охорони праці поширюються на електриків освітньої установи, які виконують роботи з ремонту та обслуговування електроустаткування.

До самостійного виконання робіт з ремонту та обслуговування електричного обладнання допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання за фахом, а також:

- медичний огляд і не мають протипоказань за станом здоров'я до виконання даної роботи;

- вступний і первинний на робочому місці інструктажі з охорони праці;

- навчання безпечним методам і прийомам праці;

перевірку знань правил улаштування електроустановок, правил безпеки при експлуатації електроустановок, вимог охорони праці;

при ремонті і обслуговуванні електрообладнання напругою до 1000В мають групу з електробезпеки не нижче III, а понад 1000В - не нижче IV.

Електрику необхідно знати і виконувати вимоги інструкції з охорони праці при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, інструкцій по роботі з ручним інструментом, електричним інструментом і драбинами.

Електрику при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування слід дотримуватися вимог Правил безпечної експлуатації електричних установок споживачів і Правил технічної експлуатації електричних установок споживачів, і мати відповідну групу з електробезпеки згідно з вимогами цих Правил.

Виконуючи роботи з ремонту та обслуговування електричного обладнання, може спостерігатися вплив нижчеперелічених шкідливих і небезпечних виробничих факторів:

- падіння з висоти;
- ураження електричним струмом;
- підвищена напруженість електричного поля;
- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- підвищений рівень вібрації;
- недостатня освітленість робочої зони;
- фізичні перевантаження;
- нервово-психічні перевантаження.

Електрику при виконанні ремонту і обслуговування електроустаткування необхідно використовувати наведені нижче ЗІЗ:

- напівкомбінезон бавовняний - на 12 місяців;
- рукавички на - 3 місяці;

черевики шкіряні на - 24 місяці;
калоші діелектричні - чергові;
рукавиці діелектричні - чергові;
килимки діелектричні - чергові.

Електрик при ремонті і обслуговуванні електрообладнання зобов'язаний:

тримати у чистоті і порядку своє робоче місце;
дотримуватися Правил внутрішнього трудового розпорядку;
вміти застосовувати засоби індивідуального, колективного захисту, засоби пожежогасіння;

вміти надавати першу допомогу потерпілим від нещасних випадків;

знати і виконувати всі вимоги нормативних актів з охорони праці, правил протипожежного захисту та виробничої санітарії.

негайно повідомляти своєму безпосередньому керівнику про будь-який нещасний випадок, що трапився на виробництві, про ознаки професійного захворювання, а також про ситуацію, яка створює загрозу життю і здоров'ю людей;

знати терміни випробування захисних засобів і пристосувань, правила експлуатації, догляду та користування ними. Не дозволяється використовувати захисні засоби і пристосування з простроченим терміном перевірки;

виконувати тільки доручену роботу;

дотримуватися вимог інструкцій з експлуатації обладнання;

знати, де знаходяться засоби надання допомоги, первинні засоби пожежогасіння, головний і запасні виходи, шляхи евакуації в разі аварії або пожежі;

знати номери телефонів медичної установи (103) і пожежної охорони (101).

Електрик може відмовитися від виконання дорученої йому роботи, якщо виникла виробнича ситуація, яка становить загрозу для його життя і здоров'я оточуючих, або для навколишнього середовища, і доповісти про це своєму прямому керівнику.

На робочому місці заборонено курити, вживати алкогольні напої та інші речовини, які надають наркотичну дію на організм людини.

З метою запобігання отримання травм і виникнення травмонебезпечних ситуацій слід дотримуватися нижчеперелічених вимог: не можна залучати до роботи сторонніх осіб;

не починати роботу в разі відсутності умов для її безпечного виконання;

виконувати роботу тільки на справному обладнанні, зі справними пристроями та інструментом;

виявивши несправність терміново доповісти безпосередньому керівнику або усунути їх власними силами, якщо це відноситься до посадових обов'язків;

не торкатися неізольованих або пошкоджених проводів;

не виконувати роботу, яка не входить до професійних обов'язків.

Вміти надавати першу допомогу при кровотечах, переломах, опіках, ураженнях електричним струмом, раптовому захворюванні або отруєнні.

Дотримуватися правил особистої гігієни:

верхній одяг, головний убір і інші особисті речі слід залишати в гардеробі;

працювати в чистому спецодязі;

приймати їжу в призначеному для цього місці.

Вміти правильно користуватися ЗІЗ та засобами колективного захисту, первинними засобами пожежогасіння, протипожежним інвентарем, знати, де вони знаходяться.

Особи, які порушили цю інструкцію з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, несуть дисциплінарну, адміністративну, матеріальну і кримінальну відповідальність відповідно до чинного законодавства України.

Вимоги безпеки перед початком роботи

Одягти спецодяг, провести огляд і підготовку робочого місця, прибрати зайві предмети.

Видалити із зони проведення робіт сторонніх осіб і звільнити робоче місце від сторонніх матеріалів та інших предметів, обгородити робочу зону і встановити знаки безпеки.

Переконатися в достатньому освітленні робочого місця, відсутність електричної напруги на відремонтованому обладнанні.

Оглянути на справність вимикачі, розетки електричної мережі, електровілок, електричних проводів, з'єднувальних кабелів, переконатися в наявності і справності ЗІЗ (засобів індивідуального захисту) і попереджувальних пристроїв (рукавичок діелектричних, окулярів захисних, калош, килимків і т. п.).

Виконуючи роботи з інструментом необхідно упевнитися в його справності, в відсутності механічних пошкоджень ізоляційного покриття і в своєчасності проходження випробувань інструменту.

Провести перевірку робочого місця на відповідність вимогам пожежної безпеки, на достатність освітлення робочого місця.

Виявивши недоліки і порушення з питань електричної і пожежної безпеки, негайно доповісти своєму безпосередньому керівнику.

6.2 Вимоги безпеки під час виконання робіт

Виконуючи посадові обов'язки, електрик зобов'язаний мати при собі посвідчення перевірки знань з питань охорони праці. За відсутності посвідчення або наявності посвідчення з терміном перевірки, працівник не отримує допуск до роботи.

Роботи в електричних установках щодо заходів безпеки поділяються на 3 категорії:

- зі зняттям напруги;
- без зняття напруги на струмопровідних частинах або біля них;
- без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою.

Працівники, які виконують спеціальні види робіт, до яких висуваються додаткові вимоги безпеки, повинні бути навчені безпечному проведенню таких робіт і мати про це відповідний запис в посвідченні про перевірку знань.

Працівникові, який обслуговує закріплені за ним електричні установки напругою до 1000 В одноосібно, необхідно мати III групу з електробезпеки.

Виконуючи роботи в електричних установках потрібно проводити організаційні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

- оформляти роботи нарядом-допуском, розпорядженням відповідно до переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації;
- проводити підготовку робочих місць;
- допуск до роботи;
- здійснювати контроль над виконанням робіт;
- переводити на інше робоче місце;
- установлювати перерви в роботі та її закінчення.

Для підготовки робочого місця до роботи, яка вимагає зняття напруги, необхідно застосувати, в певному порядку, наведені нижче технічні заходи:

виконати необхідні відключення і вжити всіх заходів, що виключають помилкове або самовільне включення комутаційної апаратури;

розвісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційною апаратурою;

провести перевірку на відсутність напруги на струмопровідних частинах, які повинні бути заземлені для захисту людей від ураження електричним струмом;

встановити заземлення (включити заземлюючі ножі, застосувати переносні заземлення);

встановити огорожі, якщо необхідно, близько робочих місць або струмоведучих частин, що залишилися під напругою, а також вивісити на даних огорожах плакати безпеки.

в залежності від місцевих умов, струмовідні частини обгородити до чи після їх заземлення.

Працювати без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу них слід як мінімум двом працівникам, одному з них, керівнику робіт, необхідно мати групу IV; іншим групу III з обов'язковим оформленням роботи нарядом-допуском або розпорядженням.

При знятті і встановленні запобіжників під напругою в електроустановках напругою до 1000 В слід заздалегідь відключити всі навантаження, які підключені до зазначених запобіжників; використовувати при цьому ізолюючі кліщі або діелектричні рукавички, а якщо є відкриті плавкі вставки, то і захисні окуляри.

Роботу з використанням драбин потрібно проводити вдвох, один з працівників повинен перебувати знизу. Стояти на ящиках або інших предметах забороняється. При установці приставних драбин на балках,

елементах металевих конструкцій і т. п. слід надійно закріпити верхню і нижню частину драбини на конструкціях.

Під час обслуговування та ремонту електричних установок користуватися металевими драбинами забороняється.

6.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування

Відключити (від'єднати) необхідне електрообладнання, електроінструмент від мережі.

Навести порядок на робочому місці, прибрати в спеціальні місця деталі, матеріал, сміття і відходи.

Прибрати у відведене місце весь інструмент і пристосування.

Зняти і прибрати спецодяг, ЗІЗ, ретельно помити руки.

Провести огляд робочого місця на відповідність його всім вимогам протипожежного захисту.

Повідомити своєму безпосередньому керівнику про недоліки і несправності, які були під час виконання роботи. Зафіксувати це в оперативному журналі.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пожежі:

вимкнути електричне обладнання, припливно-витяжну вентиляцію, якщо вона є;

повідомити в пожежну частину за телефоном 101 і доповісти про це своєму керівнику, а при його відсутності іншій посадовій особі;

приступити до ліквідації осередка загоряння, застосовуючи передбачені для цього засоби пожежогасіння. Виконувати гасіння електричного обладнання, що знаходиться під напругою, можна тільки

вуглекислотними вогнегасниками типу ОУ або піском. Гасити їх водою або пінним вогнегасником забороняється.

Електрик повинен пам'ятати, що при раптовому відключенні напруги, вона може бути подана знову без попередження.

Слід швидко відключити механізми і пристрої:

- в разі раптового відключення електроенергії,;
- якщо подальша їх робота загрожує безпеці працівників;
- в разі відчуття дії електричного струму при торканні металевих частин пускової апаратури;
- в разі іскріння;
- при найменших ознаках загоряння, появи диму, запаху гару;
- якщо з'явився незнайомий шум.

У разі короткого замикання в мережі електроживлення необхідно знеструмити обладнання і повідомити своєму прямому керівнику.

Якщо сталося ураження електричним струмом, слід звільнити потерпілого від дії електричного струму, для чого відключити електричну мережу або від'єднати потерпілого від струмопровідних частин за допомогою діелектричних захисних засобів та інших ізолюючих речей і предметів (сухий одяг, суха жердина, прогумований матеріал і т. п.), або перерізати (перерубати) провід будь-яким інструментом з ізолюючою рукояткою, обережно, без додаткового нанесення травм потерпілому. До прибуття медпрацівника необхідно надати потерпілому першу допомогу.

При нещасних випадках (травмуванні людини) негайно повідомити про це безпосереднього керівника.

6.4 Розрахунок захисного заземлення

Захисне заземлення забезпечує зниження напруги дотику при замиканні на корпус до відносно безпечних значень шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання, вирівнювання потенціалів підвищенням потенціалів місця, на якому стоїть людина, до значень, що близькі до потенціалу заземлених конструктивних частин обладнання.

Розрахунок захисного заземлення має на меті визначення основних параметрів заземлення – кількість, розміри та порядок розміщення одиночних заземлювачів та заземлюючих провідників, при яких напруга дотику та кроку в період замикання фази на заземлений корпус не перевищує допустимих значень.

Розрахунок захисного заземлення здійснюється для випадку розташування заземлювача в однорідній землі. При цьому враховується опір верхнього шару землі (шар сезонних змін), який обумовлений замерзанням або засухою ґрунту. Розрахунок, який заснований на коефіцієнтах використання провідності заземлювача називається способом коефіцієнтів використання. Його виконують, як при простих, так і при складних конструкціях групових заземлювачів.

Загальні вимоги електробезпеки повинні відповідати ДСТУ 7237:2011. Для захисту від уражень електричним струмом використовують захисне заземлення. Воно повинно захищати людей від уражень електричним струмом у випадку дотику до металевих неструмопровідних частин, які можуть опинитись під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, це досягається з'єднанням металевих частин електроустановок з землею, або її еквівалентом.

Згідно з класифікацією приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом (ПУЕ 1.1.6.), приміщення в якому проводяться всі роботи відноситься до першого класу (без підвищеної небезпеки). Під час

роботи використовуються електроустановки з напругою живлення 36 В, 220 В, та 360 В. Опір контура заземлення повинен мати не більше 4 Ом.

Розрахунок проводять за допомогою методу коефіцієнта використання (екранування) електродів. Коефіцієнт використання групового заземлювача η – це відношення діючої провідності цього заземлювача до найбільш можливої його провідності за нескінченно великих відстаней між його електродами.

При розрахунку заземлювачів в однорідній землі способом коефіцієнтів використання значення опору R захисного заземлення визначаємо в наступному порядку:

обчислюємо опір пристрою заземлення R_z . Згідно правил улаштування електроустановок (ПУЕ) найбільш припустимі значення R_z , складають для установок до 1000 В:

10 Ом при сумарній потужності генераторів або трансформаторів, що живлять дану мережу, не більше 100 кВА;

4 Ом у всіх інших випадках.

- визначаємо необхідний опір штучного заземлювача $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{R_e \cdot R_z}{R_e - R_z}, \quad (4.1)$$

де R_e – опір розтікання природного заземлювача, Ом; R_z – необхідний опір заземлюючого пристрою, Ом.

- обчислюємо кількість вертикальних і довжину горизонтальних електродів:

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{S}}{a'}, \quad (4.2)$$

де n – кількість вертикальних електродів, штук; S – площа цеху, m^2 ; a' – задана відстань між електродами, м.

$$l_r = 2a + 2b, \quad (4.3)$$

де l_r – сумарна довжина горизонтальних електродів, м; a – ширина сторони цеху, м; b – довжина сторони цеху, м.

- розраховуємо опори розтікання вертикального R_v та горизонтального R_g електродів:

$$R_v = \frac{\rho_{роз,в}}{2 \cdot \pi \cdot l_v} \left(\ln \frac{2l_v}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_v}{4t - l_v} \right), \quad (4.4)$$

де $\rho_{роз,в}$ – розрахунковий питомий опір землі для вертикального електрода, Ом·м;

l_v – довжина вертикальних стрижневих електродів, м; d – діаметр електрода, мм;

t – глибина занурення в землю верхнього кінця електрода, м;

$$R_g = \frac{\rho_{роз,г}}{2 \cdot \pi \cdot l_g} \cdot \ln \frac{2l_g}{0,5 \cdot b' \cdot t}, \quad (4.5)$$

де $\rho_{роз,г}$ – розрахунковий питомий опір для горизонтального електрода, Ом·м;

l_g – довжина горизонтальних електродів, м; b' – товщина горизонтального електрода, м.

- за даними таблиці 4.1 та таблиці 4.2 визначаємо коефіцієнти використання для вертикальних та горизонтальних електродів η_v та η_g та з їх врахуванням обчислюємо розрахунковий опір заземлювача за виразом:

$$R_z = \frac{R_v \cdot R_g}{R_v \cdot \eta_g + R_g \cdot \eta_v \cdot n}, \quad (4.6)$$

Для розрахунку заземлювача задаємось такими вихідними даними: виробничий цех площею $S=5000$ м² і з понижуючою підстанцією 10/0,4 кВ. Заземлювач передбачається виконати з вертикальних стрижневих електродів довжиною $l_v=5$ м, діаметром $d=12$ мм і відстанню між ними $a'=5$ м та горизонтальних електродів (сталеві смуги перетином 440 мм) на глибині $t=0,8$ м. Розрахункова величина питомого опору ґрунту у місці спорудження захисного заземлення береться з таблиці 6.3 (для чорнозема $c=20$ Ом/м). Коефіцієнти вертикальної прокладки K_v і горизонтальної прокладки K_g приймаються з таблиці 6.4 (для третього кліматичного району $K_v=1,3$, $K_g=2,5$).

Талиця 4.1 – Коефіцієнт використання горизонтального стрічкового електрода, що з'єднує вертикальні електроди (труби, кутики і ін.) групового заземлювача

Відношення відстані між вертикальним і електродами до їх довжин	Число вертикальних електродів							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Вертикальні електроди розміщені в ряд								
1.	0,8 5	0,7 7	0,7 2	0,6 2	0,4 2	-	-	-
2.	0,9 4	0,8 0	0,8 4	0,7 5	0,5	-	-	-
3.	0,9 6	0,9 2	0,8 8	0,8 2	0,6 8	-	-	-
Вертикальні електроди розміщені по контуру								
1.	-	0,4 5	0,4 0	0,3 4	0,2 7	0,2 2	0,2 0	0,1 9
2.	-	0,5 5	0,4 8	0,4 0	0,3 2	0,2 9	0,2 7	0,2 3
3.	-	0,7 0	0,6 4	0,5 6	0,4 5	0,3 9	0,3 6	0,3 3

Талиця 4.2 – Коефіцієнт використання вертикальних електродів групового заземлювача (труб, кутиків, і т. ін.) без урахування впливу стрічки зв'язку

Число заземлювачів	Число вертикальних електродів					
	1.	2.	3.	1.	2.	3.
	Електроди, розміщені в ряд			Електроди, розміщені по контуру		
2	0,85	0,91	0,94	-	-	-
4	0,73	0,83	0,89	0,69	0,78	0,85
6	0,65	0,77	0,85	0,61	0,73	0,80
10	0,59	0,74	0,81	0,56	0,68	0,76
20	0,48	0,67	0,76	0,47	0,63	0,71
40	-	-	-	0,41	0,58	0,66
60	-	-	-	0,39	0,55	0,64
100	-	-	-	0,36	0,52	0,62

Таблиця 4.3 – Розрахункові значення питомих електричних опорів ґрунтів

Ґрунт	Значення, які рекомендуються для розрахунків, Ом/м
Пісок	700
Супісок	300
Суглинок	100
Глина	40
Чорнозем	20
Торф	20

Таблиця 4.4 – Значення підвищувальних коефіцієнтів K_r , K_v за кліматичними зонами

Кліматична зона	Тип заземлювачів	
	Горизонтально прокладені заземлювачі (смугові та ін.) при глибині від поверхні ґрунту $t=0,8$ м, K_r	Стрижневі вертикально встановлені заземлювачі при глибині від поверхні землі $t=0,5-0,8$ м, K_v
I	4,5–7	1,8–2
II	3,5–4,5	1,6–1,8
III	2,5–4	1,4–1,6
IV	1,5–2	1,2–1,4

Розрахункові питомі опори ґрунту для вертикальних і горизонтальних заземлювачів визначаються відповідно так:

$$\rho_{роз.в} = K_v \cdot \rho, \text{ Ом/м}, \quad (6.7)$$

$$\rho_{роз.г} = K_r \cdot \rho, \text{ Ом/м} \quad (6.8)$$

Таким чином за формулами (6.7), (6.8), для чорнозему:

$$\rho_{роз.в} = 1,3 \cdot 20 = 26, \text{ Ом/м};$$

$$\rho_{роз.г} = 2,5 \cdot 20 = 50, \text{ Ом/м}.$$

У якості природного заземлювача використовуємо металеву технологічну конструкцію з опором розтікання природного заземлювача

$$R_e = 15 \text{ Ом}.$$

Здійснюємо розрахунок у відповідності з зазначеною послідовністю:

- згідно ПУЕ необхідний опір заземлюючого пристрою складає:

$$R_3 = 4 \text{ Ом};$$

за формулою (6.1) визначимо необхідний опір штучного заземлювача $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{15 \cdot 4}{15 - 4} = 5,5 \text{ Ом};$$

за формулами (4.2), (4.3) обчислюємо кількість вертикальних та довжин горизонтальних електродів:

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{5000}}{5} = 5 \text{ штук},$$

$$l_r = 2 \cdot 50 + 2 \cdot 100 = 300 \text{ м};$$

за формулами (4.4), (4.5) розраховуємо опори розтікання вертикального R_v та горизонтального R_h електродів:

$$R_v = \frac{26}{2 \cdot \pi \cdot 5} \left(\ln \frac{2 \cdot 5}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right) = 5,7 \text{ Ом},$$

$$R_h = \frac{50}{2 \cdot \pi \cdot 300} \cdot \ln \frac{2 \cdot 300}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,8} = 0,3 \text{ Ом};$$

за даними таблиць (4.10, (4.11) обираємо коефіцієнти використання для вертикальних та горизонтальних електродів $K_v=0,4$ та $K_h=0,21$;

обчислюємо розрахунковий опір заземлювача R за формулою (4.6):

$$R_r = \frac{5,7 \cdot 0,3}{5,7 \cdot 0,21 + 0,3 \cdot 0,4 \cdot 56} = 0,22 \text{ Ом}.$$

Таким чином, проєктований заземлювач є контурним, складається з 56 вертикальних стрижневих електродів довжиною 5 м і діаметром 12 мм та горизонтального електрода у вигляді сталеві смуги довжиною 300 м, перетином 440 мм^2 , занурених у землю на 0,8.

ВИСНОВКИ

Розроблено нову схему контролера дозування сировини при виробництві пелет; зокрема, у виробництві кормів з тестуванням і впровадженням на заводі. Запропонований контролер спрямований на вирішення низки проблем, які переважають у різних конфігураціях дозування на підприємствах. Нова схема контролера прагне бути легшою для конфігурації та більшою стійкістю до зовнішніх перешкод, що має привести до системи керування дозуванням із підвищеною точністю, меншою кількістю тривог і меншим часом, витраченим на налаштування системи.

За допомогою ітераційного процесу розробляється остаточний контролер дозування. Пропорційний зворотний зв'язок контролера перевірено, що дало уявлення про динаміку процесу з безперервними керуючими входами. Потім було перевірено контролер зворотного зв'язку з кількома станами, де вага регулюється на основі пропорційного регулятора, а швидкість потоку сировини контролюється інтегрованим контролером зворотного зв'язку. Щоб керування потоком було надійним, використовується фільтр для послаблення зовнішніх завад. Нелінійні зважені функції похибок також використовуються для отримання більш бажаної динаміки контролера. Нарешті, для зменшення складності під час взаємодії з новою схемою контролера використовується алгоритм оптимальної оцінки параметрів керування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Åström K., Hägglund T. The future of PID control. *Control Engineering Practice*. 2001, 9(11), 1163–1175. doi: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00062-4). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066101000624>.
2. Besharati Rad A., Lo W.L., Tsang K. Self-tuning PID controller using newton-raphson search method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1997, 44(5), 717–725. doi: 10.1109/41.633479.
3. Xu X., Xie H., Shi J. Iterative learning control (ILC) guided reinforcement learning control (RLC) scheme for batch processes. In *Proceedings of the 2020 IEEE 9th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)*, 2020, 241–246. doi: 10.1109/DDCLS49620.2020.9275065.
4. Model structure detection and parameter estimation. In *Nonlinear System Identification*. John Wiley & Sons, Ltd. 2013, ch. 3, 61–104. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118535561.ch3>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118535561.ch3>.
5. Welch G., Bishop G. An introduction to the kalman filter. *Proc. Siggraph Course*. 2006, 8.
6. Doicin B., Popescu M., Patrascioiu C. PID controller optimal tuning. In *Proceedings of the 2016 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2016, 1–4. doi: 10.1109/ECAI.2016.7861175.
7. Shannon C. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*. 1949, 37(1), 10–21. doi: 10.1109/JRPROC.1949.232969.
8. R. L. Jr R. Filterpy. URL: <https://github.com/rlabbe/filterpy>(дата звернення: 16.03.2024).
9. Géron A. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*. O'Reilly Media, Inc. 2017.

10. Zheng C., Zhou L., Li F. Two-dimensional model predictive iterative learning control based on just-in-time learning method for batch processes. In Proceedings of the 2023 IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS), 2023, 1353–1358. doi: 10.1109/DDCLS58216.2023.10166437.
11. Diahovchenko I., Kolcun M., Čonka Z., Savkiv V., Mykhailyshyn R. Progress and challenges in smart grids: Distributed generation, smart metering, energy storage and smart loads. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 2020. Vol. 44. P. 1319-1333. <https://doi.org/10.1007/S40998-020-00322-8>.
12. Palamar A., Pettai E., Beldjajev V. Control System for a Diesel Generator and UPS Based Microgrid. *Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering*. 2010. Vol. 27. P. 47-52.
13. Vasylykivskyi I., Ishchenko V., Pohrebennyk V., Palamar M., Palamar A. System of water objects pollution monitoring. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2017)*, Vienna, Austria, November, 27–29, 2017. Vol. 17, No. 33. P. 355-362.
14. Wieclaw L.; Pasichnyk V.; Kunanets N.; Duda O.; Matsiuk O.; Falat P. Cloud computing technologies in “smart city” projects. In Proceedings of the 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). Bucharest: Romania, 21–23 September 2017. pp. 339–342.
15. Yaskiv V. Using of High-Frequency Magnetic Amplifier in Switch Mode DC Power Supplies. *Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC'04)*, Aachen, 2004. P. 1658–1662.
16. Development of Digital Platform to Identify and Monitor the Digital Business Transformation Index, Strutynska, I., Dmytrotso, L., Kozbur, H., Dudkin, P.,

- Dudkina, O., International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, 2020, 2, pp. 171–175, 9322016
17. Information technology to support the digital transformation of small and medium-sized businesses, Mosiy, L., Kozbur, H., Strutynska, I., Mosiy, O., Yatsyshyn, V. CEUR Workshop Proceedings, 2024, 3742, pp. 150–165
 18. Analysis of the SMEs' Digitalization State Using HIT Index and Machine Learning Technique, Strutynska, I., Kozbur, H., Dmytrotsa, L., Kozbur, I., Gashchyn, N., Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2023, pp. 332–337
 19. Working-Out of Recommendation System to Increase the Digital Maturity Level of Enterprises, Strutynska, I., Dmytrotsa, L., Kozbur, H., Hlado, O., Sorokivska, O., 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2020 - Proceedings, 2021, pp. 147–151, 9467978
 20. The Unification of Approaches to Measuring the Digital Maturity of Business Structures (International and Domestic Approaches) / Strutynska, I., Dmytrotsa, L., Kozbur, H., Melnyk, L., Sherstiuk, R., CEUR Workshop Proceedings, 2021, 3013, pp. 10–23
 21. Автоматизація виробничих процесів : навч. посіб. / Проць Я. І., Савків В. Б., Шкодзінський О. К., Ляшук О. Л. Тернопіль : ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 344с.
 22. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
 23. Букетов А. В., Стухляк П. Д., Кальба Є. М. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів. Тернопіль: Збруч, 2005. 182 с.

24. Драган Я.П., Яворський Б. І., Яворська Є. Б. Концепції і принципи побудови моделей для означення метрологічних характеристик ритміки кардіосигналів. Вісник нац. унів. "Львівська політехніка": зб. наук. пр. Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2002. № 443. С. 200-205.
25. Коваль В. П., Івасечко Р. Р., Козак К. М. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2015. № 3. С. 2-10.
26. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
27. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.
28. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.
29. Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.
30. Стухляк П.Д., Букетов А.В. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням. Тернопіль: Збруч, 2009. 237 с.
31. Ткачук Р., Яворський Б. Метод побудови біотехнічної системи для оцінювання електроретинограм з підвищеною вірогідністю та ефективністю. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2009. №3. С. 102-110.
32. Юзьків А. В., Яворський Б. І. Математичне моделювання електроретинографічних сигналів. Вісник ТДТУ. Тернопіль, 1997. № 2. С. 40-45.

33. Яворський Б. І. Математичні основи радіоелектроніки. Частина І. Тернопіль: ТПІ імені Івана Пулюя. 1996. 184 с.
34. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.
35. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
36. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0: навчальний посібник / Коноваленко І.В., Марущак П.О. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2020 – 320 с.
37. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с.
38. Медвідь В.Р., Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, В.Р. Медвідь, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. – 354 с., ISBN 978-966-305-045-4, <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/20504>.
39. Савків В.Б., Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2021. 50 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35172>
40. Основи наукових досліджень і теорія експерименту : Навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка» /

- укл. Ю. Б. Капаціла, П. О. Марущак, В. Б. Савків, О. П. Шовкун.
Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. 186 с.
41. Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження частотних характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – с. 16.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39207>
 42. Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.
 43. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 26с.
 44. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 4. «Мікросхемотехніка» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 44с.
 45. Розробка мікропроцесорної системи керування на основі мікропроцесорного комплекту КР580 та на основі ОМЕОМ К1816ВЕ51/ Методичні вказівки для виконання курсового проєкту з дисципліни "Електроніка і мікропроцесорна техніка" //Медвідь В.Р, Пісьціо В.П., Микулик П.М. Тернопіль: ТНТУ - 2016. 108 с.
 46. Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по

- курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>
47. Лабораторний практикум з проектування та моделювання роботи електропневматичних схем у середовищі програмного пакету «FluidSIM Pneumatics» з курсу «Технічні засоби автоматизації» / укл. : О.К. Шкодзінський. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 32 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31418>
 48. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с.
 49. Автоматизація виробничих процесів: Навчальний посібник / Я.Проць, О.Данилюк, В.Савків - ТДТУ. 2005. -264с.
 50. Методичні вказівки з виконання курсової роботи з дисципліни «Основи наукових досліджень» для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / укл. : П.О. Марущак , Ю.Б. Капаціла , Р.І. Михайлишин. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2018. - 75 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26145>
 51. Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 21 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/32136/>.
 52. Методичні рекомендації для практичних занять з курсу «Засади провадження наукової діяльності» / укл. : Дмитрів Олена Романівна,

Рогатинський Роман Михайлович. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2024. – 112 с., <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44669>.

53. Введення в комп'ютерну графіку та дизайн: Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"/Укладачі: О.В. Тотосько, П.Д. Стухляк, А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, Р.З. Золотий - Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023 - 304с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41166>.